

3301 電気自動車における前後輪制駆動力配分による航続距離延長制御の実走行試験および台上評価

Field and Bench Test Evaluation of Range Extension Control System for Electric Vehicles Based on Front and Rear Driving-Braking Force Distribution

○原田 信吾 (東京大学) 藤本 博志 (東京大学)
後藤 雄一 (交通安全環境研究所) 川野 大輔 (交通安全環境研究所)
松尾 祐介 (小野測器)

Shingo Harada, Hiroshi Fujimoto, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba
Yuichi Goto, Daisuke Kawano, National Traffic Safety and Environment Laboratory
Yusuke Matsuo, Ono Sokki Co.,Ltd.

Recently, researches on cruising range extension for electric vehicles (EVs) have been conducted in the world. In this paper, proposal and evaluation of a range extension control system (RECS) are demonstrated. The proposed method optimizes front and rear driving-braking force distribution ratio. The effectiveness of the proposed method is verified by field and bench test.

Key Words: electric vehicle, range extension control system, driving and braking force distribution, bench test

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。電気自動車はモータの応答の速さを活用可能なため、内燃機関自動車と比較して環境面だけでなく運動制御面でも優位性を持つ [1]。

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、低速域と高速域で特性を変更しモータ効率の高い動作範囲を広くする研究 [2] が行われている。また、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て、トルク配分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 [3] 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、クラッチ機構の追加 [3] 等の構成の変更をすることなく、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 [4, 5]。その一つとして、以前直進かつ加減速時における RECS [6] を提案した。しかし、有効性の確認は低速度領域のみでされており、モデル化が困難とされている鉄損が支配的になる高速度域での検証はされていない。そのため、航続距離延長制御システムのより適切な評価として高速度域までを含めた試験を行う必要がある。

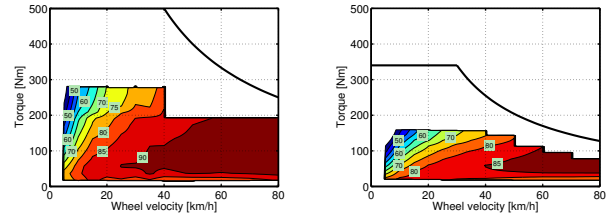
そこで、本稿は一般的な評価方法である実走行試験 [5] に加えて、台上試験装置を用いて比較的高速度域を含めた評価を行った。台上試験装置では極めて再現性の高い測定が可能である。実走行・台上試験結果より提案する航続距離延長制御の有効性を示す。

2 実験車両と車両モデル

2.1 実験車両 本研究では、著者らの研究グループで製作した電気自動車 FPEV-2 Kanon を使用した。この車両は、4 輪全てに東洋電機製造製ダイレクトドライブ方式アウトロータ型インホイールモータを搭載している。図 1 に実験車両とインホイールモータの効率マップ (実測値) を示す。本車両に搭載されているインホイールモータは前後で異なるため、効率特性も前後輪モータで異なる。従って、効率特性の違いを上手く利用することで航続距離の延長が図れる。



(a) FPEV-2 Kanon.



(b) Front motor efficiency (measured). (c) Rear motor efficiency (measured).

Fig.1 Experimental vehicle.

2.2 車両モデル 本節では 4 輪独立駆動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 (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 (2) 式、(3) 式で表される。

$$J\omega_j \dot{\omega}_j = T_j - rF_j \quad (1)$$

$$M\dot{V} = F_{\text{all}} - F_{\text{DR}} = 2(F_f + F_r) - F_{\text{DR}} \quad (2)$$

$$F_{\text{all}} = 2(F_f + F_r) \quad (3)$$

ここで、 ω_j [rad/s] は車輪角速度、 V [m/s] は車体速度、 T_j [Nm] は車輪軸周りのトルク、 F_{all} [N] は総制駆動力、 F_j [N] は一輪当たりの制駆動力、 M [kg] は車体重量、 r [m] はタイヤ半径、 $J\omega_j$ [Nms²] は車輪回転部慣性モーメント、 F_{DR} [N] 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。

次に、スリップ率 λ_j を車輪速 $V\omega_j = r\omega_j$ と車体速 V により (4) 式で定義する。

$$\lambda_j = \frac{V\omega_j - V}{\max(V\omega_j, V, \epsilon)} \quad (4)$$

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 はほぼ λ に比例する。この傾きを D'_s とすると、タイヤに発生する駆動力は車両がある加速度 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 $N_j(a_x)$ を用いて次式で表される。

$$F_j = \mu_j(\lambda_j)N_j(a_x) = D'_s\lambda_jN_j(a_x) \quad (5)$$

2.3 前後輪制駆動力配分制御 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4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_f, F_r 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 [5]。

$$F_f = \frac{1}{2}(1-k)F_{\text{all}} \quad (6)$$

$$F_r = \frac{1}{2}kF_{\text{all}} \quad (7)$$

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。

2.4 インバータ入力電力のモデリング スリップ率およびモータ損失を考慮してインバータ入力電力を最小化する前後輪制駆動力配分比を導出する。モータの機械損およびインバータ損失を無視すると、インバータ入力電力 P_{in} は (8) 式から (11) 式で表される。

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_c + P_i \quad (8)$$

$$P_{\text{out}} = 2 \sum_{j=f,r} \omega_j T_j \quad (9)$$

$$P_c = 2 \sum_{j=f,r} \frac{R_j T_j^2}{K_{tj}^2} \quad (10)$$

$$P_i \approx 2 \sum_{j=f,r} \frac{V^2 P_{nj}^2}{r^2 R_{cj}} \left\{ \left(\frac{L_{qj}}{K_{tj}} \right)^2 T_j^2 + \Psi_j^2 \right\} \quad (11)$$

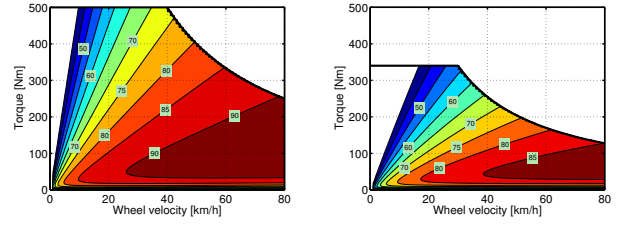
ここで、 $P_{\text{out}}[\text{W}]$ は各モータの機械出力の和、 $P_c[\text{W}]$ は各モータ銅損の和、 $P_i[\text{W}]$ は各モータ鉄損の和である。(10)式、(11)式は近似を適用することで得た [6]。これらの式において、 $R_j[\Omega]$ はモータの電機子巻線抵抗、 $K_{tj}[\text{Nm/A}]$ はモータのトルク定数、 P_{nj} は極対数、 $\Psi_j[\text{Wb}]$ は永久磁石による鎖交磁束、 $L_{qj}[\text{H}]$ は q 軸インダクタンス、 R_{cj} は等価鉄損抵抗 [7] である。本稿では等価鉄損抵抗 R_{cj} を (12) 式で表す [8]。

$$\frac{1}{R_{cj}(\omega_j)} = \frac{1}{R_{c0j}} + \frac{1}{R'_{c1j}|P_{nj}\omega_j|} \quad (12)$$

(12) 式において、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。

3 インバータ入力電力を最小化する制駆動力配分比

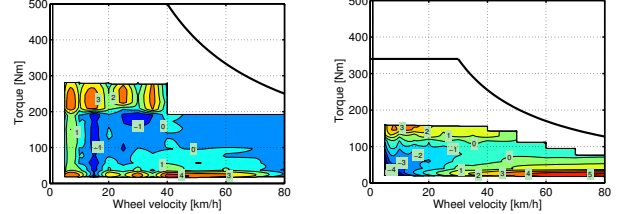
3.1 最適配分比の導出 最適な前後輪制駆動力配分比の導出において、車輪の慣性力に起因するトルクは十分小さいため $T_j = rF_j$ と近似する。車輪角速度はスリップ率 λ が微小な領域においては $\lambda \approx (V_{\omega_j} - V)/V$ と近似できるため $\omega_j = V(1 + \lambda_j)/r$ と表せる。これらの近似を (9) 式、(10) 式、(11) 式に適用する。(5) 式、(6) 式および (7) 式より、 F_j と ω_j は配分比 k の関数となる。したがって、 P_{in} は k の関数 $P_{\text{in}}(k)$ として表される [6]。 $P_{\text{in}}(k)$ は k についての 2 次関数であるため、インバータ入力電力を最小化する前後輪制駆動力配分比を k_{opt} とすると、 $\partial P_{\text{in}}/\partial k|_{k=k_{\text{opt}}} = 0$ が成り立つ。これを解くことで、 k_{opt} は V



(a) Front motor.

(b) Rear motor.

Fig.2 Motor efficiency (calculated).



(a) Front motor.

(b) Rear motor.

Fig.3 Motor efficiency error.

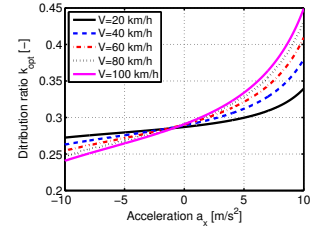


Fig.4 Optimal distribution ratio k_{opt} .

と a_x の関数として (13) 式で求まる。

$$k_{\text{opt}}(V, a_x) = \frac{\frac{V}{D'_s N_f(a_x)} + \frac{r^2 R_f}{K_{tj}^2} + \frac{V^2}{R_{cf}(V)} \left(\frac{L_{qf}}{\Psi_f} \right)^2}{\frac{V}{D'_s} \sum_{j=f,r} \frac{1}{N_j(a_x)} + r^2 \sum_{j=f,r} \frac{R_j}{K_{tj}^2} + V^2 \sum_{j=f,r} \frac{1}{R_{cj}(V)} \left(\frac{L_{qj}}{\Psi_j} \right)^2} \quad (13)$$

3.2 数値計算 図 2 に実験車両のモータ効率の計算結果を示す。ただし、等価鉄損抵抗は $R_{c0j}=300 \Omega$ 、 R'_{c1f}, R'_{c1r} をそれぞれ $0.13 \Omega/\text{rad}$ 、 $0.0525 \Omega/\text{rad}$ とした。図 1(b)、図 1(c) から分かるように、全体的に前輪モータの方が後輪モータよりも高効率となっている。また、図 3 にモータ効率の計算値から実測値を引いた値を示す。図 3 より、ほぼ全ての領域で効率の差は $\pm 5\%$ 以内となっており、本研究で用いたモデルで正しく特性を表現できている。

図 4 に (13) 式より求めた k_{opt} の値を示す。車両パラメータは FPEV-2 Kanon の値を用いた。ドライビングステイフネス D'_s は、高 μ 路の $\mu - \lambda$ 曲線から $D'_s = 12$ とした。図 4 より、 k_{opt} は加速度が増加すると大きくなり、逆に減速度が大きくなると小さくなる。これは主に荷重変動による前後輪のスリップ率および前後モータの銅損の変化の影響である。一方、車体速度が増加すると k_{opt} は全体的に大きくなる。 k_{opt} の値は 0.25 から 0.45 の間で変化しており、全体的に最適点が前輪寄りになっている。これは前輪モータの方が後輪モータよりも効率が高いためである。

4 実験

4.1 走行試験場および台上試験装置 走行試験場として、交通安全環境研究所自動車試験場を利用した。本試験場は、全長 1350 m の走行試験路の他に低 μ 路や勾配路があり、様々な条件下における試験が可能である。

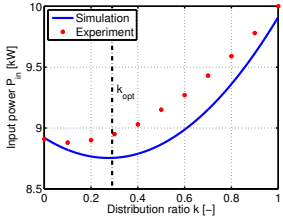


Fig.5 Experimental result of P_{in} .

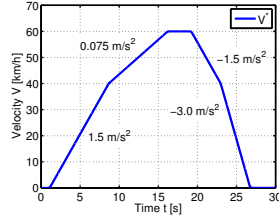


Fig.6 Reference of vehicle speed.

台上試験には(株)小野測器が所有する Real Car Simulation Bench (RC-S) を用いた。RC-S は、シャシダイナモ装置と異なり、駆動輪のドライブシャフトに軸受けホイールを介して直接ダイナモを接続する。また、車両モデルを適宜変更することで、様々な路面状況における試験が可能である。さらに、慣性の大きいローラを用いるシャシダイナモ装置と比較して応答速度の速い制御が可能であるため、モータを動力源とする電気自動車の過渡解析にも適している。風や路面状況の変化を受けずに試験を行えるため、本研究においても台上試験装置は非常に有用である。

4.2 走行抵抗の測定 シミュレーションおよび台上試験を行うために、実験車両の走行抵抗を走行試験場にて測定した。走行抵抗 $F_{DR}[N]$ は (14) 式でモデル化した。

$$F_{DR}(V) = \mu_0 Mg + \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \quad (14)$$

ここで、 μ_0 は転がり摩擦係数、 $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$ は空気密度、 C_d は抗力係数、 $A[\text{m}^2]$ は前方投影面積である。 ρ, A の値はそれぞれ $1.205 \text{ kg}/\text{m}^3, 1.2 \text{ m}^2$ とした。 μ_0, C_d は FPEV-2 Kanon における惰性走行時の減速度の実測値よりそれぞれ $1.28 \times 10^{-2}, 0.863$ と定めた。

4.3 配分比変化に対する入力電力の測定 図 5 に配分比を変化させた場合のインバータ入力電力 P_{in} の台上試験における測定結果を示す。インバータ入力電力 P_{in} は測定値を用いて次式で計算した。

$$P_{in} = V_{dc}(I_{dcf} + I_{dcr}) \quad (15)$$

ここで、 $V_{dc}[V]$ はインバータ入力電圧、 $I_{dcf}[A]$ は前輪インバータ入力電流、 $I_{dcr}[A]$ は後輪インバータ入力電流である。図 5 は加速度 a_x および車体速度 V が $0.55 \text{ m}/\text{s}^2, 40 \text{ km}/\text{h}$ の場合を台上試験装置により模擬した場合の結果である。(13) 式により計算した k_{opt} における値を一点鎖線で示す。図 5 より、 P_{in} は配分比 k の凸関数であり、 P_{in} が最小となる k が存在する。シミュレーション値を見ると、トルク、車輪速、銅損および鉄損を近似したためわずかな誤差はあるが、 k_{opt} において最小値とほぼ一致している。実験結果ではシミュレーションと比較して最適点が k の小さい点にずれている。これは、インバータ損失を無視していることや損失のモデル化誤差が原因として考えられる。しかし、実験結果においても k_{opt} 付近にて最小値をとっている。これより、本稿で行った近似は妥当であるといえる。

4.4 パターン走行試験 提案する前後輪駆動力配分の有効性を示すために、パターン走行の実走行試験および台上評価を行った。走行速度パターンを図 6 に示す。この速度パターンは、二段階の加減速と一定速で構成されており、加速度は $1.5 \text{ m}/\text{s}^2$ と $0.075 \text{ m}/\text{s}^2$ 、最高速度は $60 \text{ km}/\text{h}$ 、減速度は $-1.5 \text{ m}/\text{s}^2$ と $-3.0 \text{ m}/\text{s}^2$ である。本研究では配分比 $k = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, k_{opt}$ の 7 通りの場合で実験した。パターン走行を行うために、車体速度制御系を車両コントローラに実装した。フィードバック量である車体速度 V は実走行試験においては 4 輪の車輪速の平均値を、台上試験では RC-S による

モデル上の計算値を用いた。また、台上試験の際走行抵抗は 4.1 節で測定した走行抵抗値を用いた。

実走行試験および台上試験の結果を図 7 に示す。図 7 ではシミュレーション、実走行試験、台上試験における $k = k_{opt}$ の場合の結果を示している。図 7(a) に車体速度を示す。これより、実走行試験および台上試験においてもシミュレーション同様車体速度が指令値に追従している。図 7(b) に配分比を示す。車体速度および加速度により k_{opt} が変化している。これは前節の計算結果と一致する。図 7(c) と図 7(d) に前輪駆動力および後輪駆動力を示す。最適配分比 k_{opt} により配分されているため、前後輪で駆動力が異なる。またシミュレーションおよび台上試験の結果を実走行試験と比較すると駆動力の絶対値が一致している。よって、走行抵抗は正しくモデリングされており、台上試験においても実走行試験と同等の負荷を再現できている。

パターン走行試験における消費エネルギー W_{in} の測定結果を図 8 に示す。 P_{in} の積分により求めた W_{in} を、走行パターン中の二つの加速、一定速、二つの減速、そして全体の場合に分けて示した。本研究では実走行試験と台上試験において各配分比でそれぞれ 7 回、5 回ずつ測定を行い、平均値を求めた。エラーバーは標準偏差 σ を示す。図 8 より、シミュレーションおよび RC-S では、提案する配分法により分割した全ての領域で消費エネルギーの最小化および回生エネルギーの最大化を達成している。実走行試験においては、データのばらつきが大きく、合計してみると有効性が明らかではない。しかし、図 8(a) および図 8(e) から、加減速度の大きい場合には有効性が示されている。すなわち、トルクが大きい場合は風や路面状況の変化がエネルギーに与える影響が相対的に小さくなるためであると考えられる。また、シミュレーションと二つの試験結果を比較すると、シミュレーションでは高速領域での効率がやや悪い。これは、シミュレーションでは鉄損のモデル化誤差により、実際よりも大きく計算されているためであると考えられる。しかし、全体的にシミュレーション結果と二つの試験結果はおおよそ一致している。結果として、提案法により配分比 $k = 0.5$ の場合と比較して実走行試験・台上試験共に 7% 程度の消費エネルギー削減を達成した。

4.5 JC08 モードによる評価 より実際的な評価を行うため、台上試験装置を用いて JC08 モード走行での実験を行った。図 9 に JC08 モードの走行パターンを示す。JC08 モードにおける平均速度と最高速度はそれぞれ $34.8 \text{ km}/\text{h}$ (アイドリング時を除く) と $81.6 \text{ km}/\text{h}$ である。この試験も前節と同様に、車体速度を図 9 に示す指令値に追従するよう制御した。

表 1 に JC08 モード走行の結果を示す。配分比は $k = 0.5, k_{opt}$ の 2 通りで行った。表 1 より、提案法により 1 kWh と実験機のバッテリー容量である 5.6 kWh 当たり、それぞれ $0.4 \text{ km}, 2.3 \text{ km}$ 航続距離を延長した。前節のパターン走行よりも改善の割合が小さいのは、図 8 で示したように消費エネルギーを大きく改善できる加減速度の大きい領域の割合が小さいためである。しかし、現実の道路における走行では、JC08 モードよりも大きな加減速度の頻度が高いため、提案法によりさらに大きな航続距離延長が期待できる。

5 結論

本稿では、直進走行における航続距離延長制御システムとしてインバータ入力電力を最小化する前後輪駆動力配分比制御を提案した。実走行試験および台上試験により提案法の有効性を確認した。さらに、シミュレーション、実走行試験および台上試験において、エネルギー消費量がほぼ一致することから、台上試験に

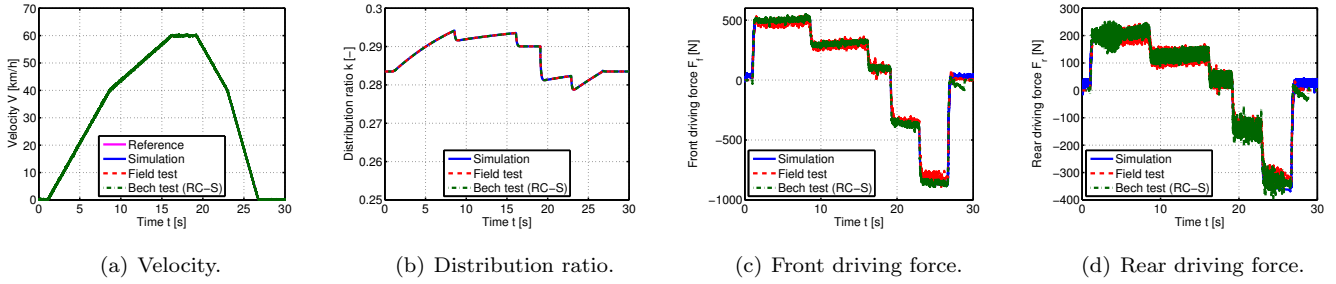


Fig.7 Experimental results of pattern driving ($k = k_{opt}$).

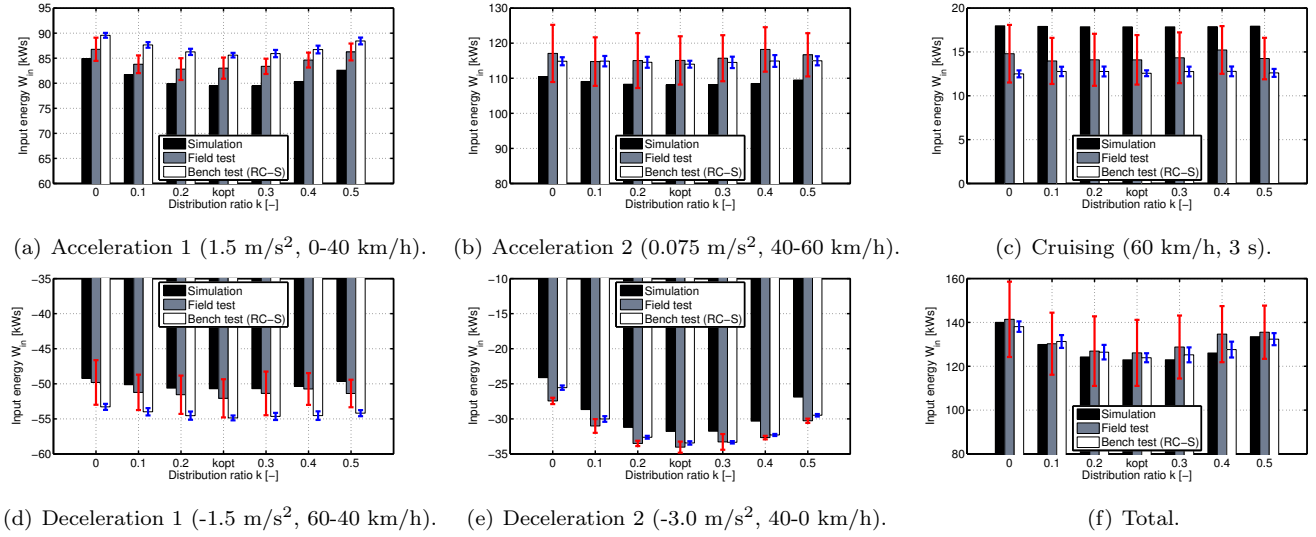


Fig.8 Experimental results of pattern driving (comparison of energy consumption).

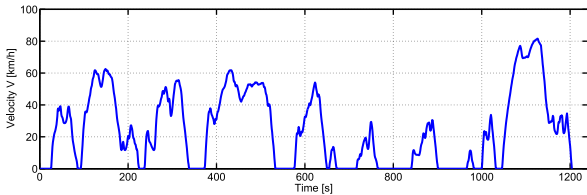


Fig.9 JC08 cycle.

Table.1 Cruising range (JC08 cycle).

k	Simulation		Bench test (RC-S)	
	0.5	k_{opt}	0.5	k_{opt}
1 kWh	11.2 km	11.6 km	12.2 km	12.6 km
5.6 kWh	62.7 km	65.0 km	68.3 km	70.6 km

おける消費エネルギー測定の有効性を確認した。今後の課題として、損失モデルの見直しやインバータ損失の考慮が挙げられる。

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。

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] H. Hijikata, T. Shigeta, N. Kariya, K. Akatsu, and T. Kato: “A Study of Dual Winding Method for Compound Magneto-

motive Force Motor”, IEEE Trans. IA, Vol. 133, No. 10, pp. 986–994 (in Japanese)

[3] X. Yuan and 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)
 [4] T. Suzuki and H. Fujimoto: “Proposal of Range Extension Control System by Drive and Regeneration Distribution Based on Efficiency Characteristic of Motors for Electric Vehicle”, in Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record, IIC–10–019, pp. 23–28 (2010) (in Japanese)
 [5] 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)
 [6] S. Harada and H. Fujimoto: “Range Extension Control System for Electric Vehicle on Acceleration and Deceleration Based on Front and Rear Driving/Braking Force Distribution Considering Slip Ratio and Motor Loss”, in Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record, IIC–13–001, pp. 1–6 (2013) (in Japanese)
 [7] S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda, and T. Hirasu: “Loss Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives”, IEEE Trans. IE, Vol. 41, No. 5, pp. 511–517 (1994)
 [8] 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)