

道路形状を考慮したEVの航続距離延長のための自動運転*

藤本 博志¹⁾ 吉田 英樹²⁾ 池澤 佑太³⁾ 川野 大輔⁴⁾ 後藤 雄一⁵⁾ 樋本 みさき⁶⁾ 佐藤 宏治⁷⁾

Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles Considering Road Shape Information

Hiroshi Fujimoto Hideki Yoshida Yuta Ikezawa Daisuke Kawano Yuichi Goto Misaki Tsuchimoto Koji Sato

Electric vehicles are environmentally-friendly, however, they have a problem that the miles-per-charge is shorter than internal combustion engine vehicles. To solve this problem, the authors' research group has proposed range extension autonomous driving (READ) system which minimizes the energy consumption by optimizing the velocity profile for autonomous vehicles. Optimal velocity profile is calculated by solving the nonlinear optimal control problem. In this paper, the READ system is extended to be applied not only to straight and flat road but also to ordinary road including slope and corner. The effectiveness of the proposed method is verified by simulations and experiments.

KEY WORDS: Electronics and control, Nonlinear Optimal Control, Motor Loss(E1)

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目ざされている。電気自動車はモータの応答の速さを利用可能なため、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⁾。

しかしながら、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欠点のために普及が妨げられている。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た、各輪へのトルク配分による消費エネルギーの検討も行われている^{(3)~(5)}。著者らの研究グループでも、モデルベースで各輪への最適なトルク配分を決定す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⁾。提案したシステムではモータ銅損、鉄損をモデル化することで、リアルタイムで最適な配分比を導出することができる。

また、近年では高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transport System) の活用によってエネルギー問題を解決しようとする研究もある⁽⁷⁾。ITS がさらに進展していけば、全ての車両が自動運転に移行していき、車両の速度はドライバーではなく自動車が決定するようになると考えられる。これが実現すれば、自動運転によって目的地まで安全に移動するだけでなく、速度軌道を最適化することで消費エネルギーを削減することも可能となる。本稿では、ITS や GPS、地図情報から勾配や旋回などの道路形状を取得できるという仮定の下、速度軌道を最適化することで消費エネルギーを最小化し、航続距離を延長する航続距離延長自動運転 (READ: Range Extension Autonomous Driving) を提案する^{(8)~(9)}。シミュレーション・実験によって提案する航続距離延長自動運転の有効性を示す。

2. 実験車両と車両モデル

2.1. 実験車両

本稿では、著者らの研究グループで製作した電気自動車



(a) FPEV-2 Kanon.

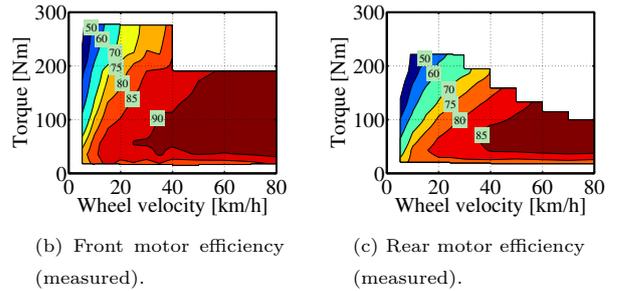


Fig.1 Experimental vehicle.

FPEV-2 Kanon を使用した。この車両は、4 輪全てにダイレクトドライブ方式アウターロータ型インホイールモータを搭載している。Fig. 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。

2.2. 車両モデル

本節では 4 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 (1) 式で表される。本稿では、駆動力差モーメントを用いないので、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)~(5) 式で表される。

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

$$M\dot{V} = F_{\text{all}} - Mgsin\theta - \text{sgn}(V)(F_{\text{DR}} + F_{\text{CR}}) \quad (2)$$

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

$$Ma_y = MV(\dot{\beta} + \gamma) = -2Y_f - 2Y_r \quad (4)$$

$$I\dot{\gamma} = 2(-l_f Y_f + l_r Y_r) \quad (5)$$

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

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

4)・5) (独)交通安全環境研究所 (182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-27)

6)・7) (株)小野測器 (226-8507 神奈川県横浜市緑区白山 1-16-1)

力, θ は道路勾配, sgn は符号関数, F_{DR} は走行抵抗, F_{CR} はコーナリング抵抗, a_y は横加速度, β は車体横滑り角, γ はヨーレート, Y_j は一輪あたりの横力, I は車体のイナーシャ, l_j は車両重心点から前後駆動点までの距離である。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} , コーナリング抵抗 F_{CR} はそれぞれ以下の式で表される⁽⁹⁾。

$$F_{\text{DR}}(V, \theta) = \mu_0 Mg \cos \theta + b|V| + \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \quad (6)$$

$$F_{\text{CR}}(V, R) = -2Y_f \sin \alpha_f - 2Y_r \sin \alpha_r \\ \simeq \frac{M^2}{2l^2} \left(\frac{l_r^2}{C_f} + \frac{l_f^2}{C_r} \right) \frac{V^4}{R^2} \quad (7)$$

ここで, μ_0 は転がり摩擦係数, b は V の一次に比例する抵抗係数, ρ は空気密度, C_d は抗力係数, A は前方投影面積, α_j は車輪横滑り角, C_j はコーナリングステイフネス, R は旋回半径である。

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 (8) 式で定義する。

$$\lambda_j = \frac{V_{\omega_j} - V}{\max(V_{\omega_j}, V, \epsilon)} \quad (8)$$

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, タイヤが発生する駆動力は, 前後一輪当たりの垂直抗力 $N_j(a_x, \theta)$ を用いて次式で表される。

$$F_j = \mu_j(\lambda_j) N_j(V, F_{\text{all}}, \theta, R) \\ = D'_s \lambda_j N_j(V, F_{\text{all}}, \theta, R) \quad (9)$$

勾配 θ の道路を前後加速度 a_x で直線運動している時の垂直抗力 N_j は以下の式で表される。

$$N_f(V, F_{\text{all}}, \theta, R) = \\ \frac{1}{2} \left[\frac{l_r}{l} Mg \cos \theta - \frac{h_g}{l} M a_x(V, F_{\text{all}}, \theta, R) \right] \quad (10)$$

$$N_r(V, F_{\text{all}}, \theta, R) = \\ \frac{1}{2} \left[\frac{l_f}{l} Mg \cos \theta + \frac{h_g}{l} M a_x(V, F_{\text{all}}, \theta, R) \right] \quad (11)$$

2.3. 前後輪制駆動力配分モデル

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, 必要な総制駆動力を4輪の総和で満たせばよく, 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。

$$F_j = \frac{1}{2} \gamma_j(k) F_{\text{all}} \quad (12)$$

$$\gamma_j(k) = \begin{cases} 1 - k & (j = f) \\ k & (j = r) \end{cases} \quad (13)$$

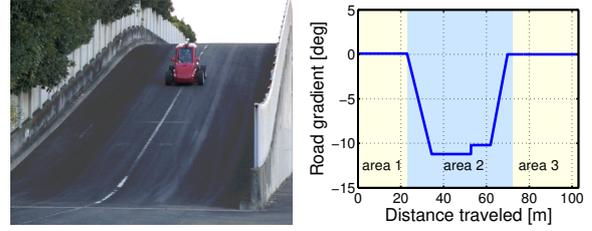
k は $0 \leq k \leq 1$ の間で変化させることができ, $k = 0$ の場合は前輪駆動となり, $k = 1$ の場合は後輪駆動となる。ただし, (1) 式より, F_j が零でも T_j が零とは限らない。

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モデル化する。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 (14)~(17) 式で表される。

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_c + P_i \quad (14)$$

$$P_{\text{out}} = 2 \sum_{j=f,r} \omega_j T_j \\ \simeq V F_{\text{all}} \sum_{j=f,r} \left(1 + \frac{\gamma_j(k) F_{\text{all}}}{2D'_s N_j(V, F_{\text{all}}, \theta, R)} \right) \gamma_j(k)$$



(a) Test road.

(b) Road gradient profile.

Fig. 2 Road gradient profile.

$$P_c = 2 \sum_{j=f,r} R_j i_{qj}^2 \quad (15)$$

$$\simeq \frac{r^2 F_{\text{all}}^2}{2} \sum_{j=f,r} \frac{R_j}{K_{tj}^2} \gamma_j^2(k) \quad (16)$$

$$P_i = 2 \sum_{j=f,r} \frac{v_{odj}^2 + v_{oj}^2}{R_{cj}} \\ \simeq 2 \frac{V^2}{r^2} \sum_{j=f,r} \frac{P_{nj}^2}{R_{cj}} \left\{ \left(\frac{r L_{qj} \gamma_j(k) F_{\text{all}}}{2K_{tj}} \right)^2 + \Psi_j^2 \right\} \quad (17)$$

ここで, P_{out} は各モータの機械出力の和, P_c は各モータ銅損の和, P_i は各モータ鉄損の和である。(15)~(17) 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 はモータの電機子巻線抵抗, i_{qj} はモータの q 軸電流, K_{tj} はモータのトルク定数, v_{odj}, v_{oj} はそれぞれ dq 軸の誘起電圧, R_{cj} は等価鉄損抵抗, ω_{ej} はモータの電気角速度, L_{dj} は d 軸インダクタンス, L_{qj} は q 軸インダクタンス, i_{odj}, i_{oj} はそれぞれ dq 軸電流と銅損電流の dq 軸成分の差, P_{nj} は極対数, Ψ_j は磁束鎖交数である。本稿では等価鉄損抵抗 R_{cj} を (18) 式で表す。

$$\frac{1}{R_{cj}(\omega_{ej})} = \frac{1}{R_{c0j}} + \frac{1}{R_{c1j} |\omega_{ej}|} \quad (18)$$

ここで, 右辺第1項は渦電流損, 第2項はヒステリシス損を示す。なお, 本稿では旋回時の左右車輪速差は考慮していない。

シミュレーションにおいて, エネルギー損失を詳細に分析するために, (19)~(24) 式のように, 機械出力 P_{out} を車両の運動エネルギー変化の仕事 P_M , 車輪の回転運動エネルギー総和変化の仕事 P_J , 走行抵抗で失われる仕事 P_{DR} , コーナリング抵抗で失われる仕事 P_{CR} , スリップで失われる仕事 P_S に分離する。

$$P_{\text{out}} = P_M + P_J + P_{\text{DR}} + P_{\text{CR}} + P_S \quad (19)$$

$$P_M = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} M V^2 \right) \quad (20)$$

$$P_J = 2 \sum_{j=f,r} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J_{\omega_j} \omega_j^2 \right) \quad (21)$$

$$P_{\text{DR}} = F_{\text{DR}} V \quad (22)$$

$$P_{\text{CR}} = F_{\text{CR}} V \quad (23)$$

$$P_S = F_{\text{all}} V \sum_{j=f,r} \gamma_j(k) \lambda_j \quad (24)$$

また, これらの積分値を以下のように定義する。

$$W_X = \int_{t_0}^{t_f} P_X(t) dt \quad (25)$$

ここで, 添え字の X には M, J, DR, CR, S, c, i が入る。

3. 勾配路における航続距離延長自動運転

本章では, Fig. 2 のような勾配路を想定し, 速度軌道を最適化することで消費エネルギーの削減を行う。

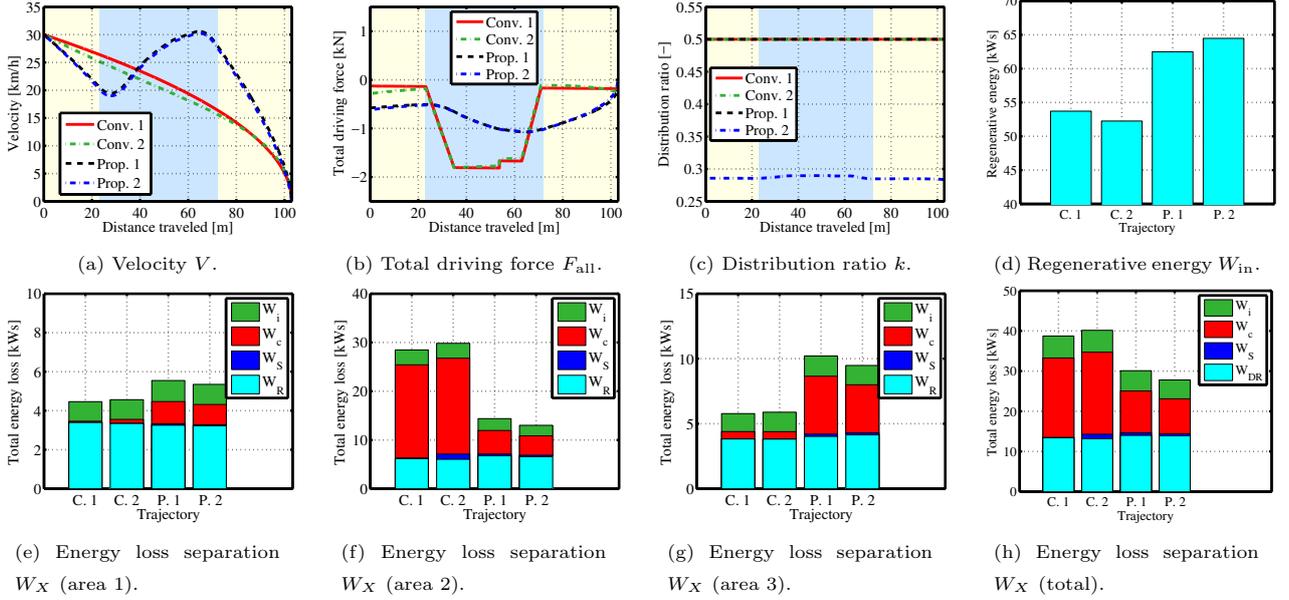


Fig. 3 Simulation results (Slope).

3.1. 比較条件

初期速度 $V_0 = 30.0$ km/h, 終端速度 $V_f = 0$ km/h, 走行距離 $X_f - X_0 = 103$ m とし, 以下の3通りの速度軌道を考える。

従来法 1(C. 1) 運転者が一定減速度で走行しているを想定し, 自動運転でそれを模擬する。速度軌道 $V(t)$ および走行時刻 $t_f - t_0$ は次式で与えられる。

$$V(t) = V_0 + \frac{V_f^2 - V_0^2}{2(X_f - X_0)}(t - t_0) \quad (26)$$

$$t_f - t_0 = \frac{2(X_f - X_0)}{(V_f + V_0)} \quad (27)$$

ただし, $k = 0.5$ とする。

従来法 2(C. 2) 勾配情報を考慮せず平地で走行した場合に総エネルギー消費量が最小となる速度軌道で自動運転を行う。すなわち, $\theta(X) = 0$ とし, 以下の最適制御問題を解くことで速度軌道を得る。ただし, 前後輪最適配分は行わない ($k = 0.5$)。提案法 1(P. 1) 勾配を考慮して, 以下の最適制御問題を数値的に解き, 導出された速度軌道で走行する。ただし, 前後輪最適配分は行わない ($k = 0.5$)。

提案法 2(P. 2) 勾配を考慮して, 以下の最適制御問題を数値的に解き, 導出された速度軌道で走行する。提案法 2 では, 速度軌道に加えて, k を最適化する。

$$\min. W_{in} = \int_{t_0}^{t_f} P_{in}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \quad (28)$$

$$\text{s.t. } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (29)$$

$$\chi(\mathbf{x}(t_0)) = \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 = \mathbf{0} \quad (30)$$

$$\psi(\mathbf{x}(t_f)) = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f = \mathbf{0} \quad (31)$$

ここで,

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} F_{all}(t) \\ k(t) \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) = \mathbf{f}(V(t), X(t), F_{all}(t))$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{M} \{ F_{all} - \text{sgn}(V) F_{DR}(V, \theta) \} \\ -Mg \sin \theta \\ V(t) \end{bmatrix} \quad (34)$$

であり, $X(t)$ は走行距離, \mathbf{x}_0 は初期条件, \mathbf{x}_f は終端条件である。

3.2. 前後輪駆動力配分比最適化

(15)~(17) 式より, $P_{in}(k)$ は k についての2次関数であるため, V および F_{all} 一定の条件で入力電力を最小化する前後輪駆動力配分比 k_{opt} は $\left. \frac{\partial P_{in}}{\partial k} \right|_{k=k_{opt}} = 0$ を満たす。よって, k_{opt} は V, F_{all}, θ の関数として (35) 式で求まる。

$$k_{opt}(V, F_{all}, \theta) = \frac{\frac{V}{D'_s N_f(V, F_{all}, \theta)} + \frac{r^2 R_f}{K_{tj}^2} + \frac{V^2}{R_{cf}(V)} \left(\frac{L_{qf}}{\Psi_f} \right)^2}{\frac{V}{D'_s \sum_{j=f,r} N_j(V, F_{all}, \theta)} + r^2 \sum_{j=f,r} \frac{R_j}{K_{tj}^2} + V^2 \sum_{j=f,r} \frac{1}{R_{cj}(V)} \left(\frac{L_{qj}}{\Psi_j} \right)^2} \quad (35)$$

3.3. シミュレーション

シミュレーション結果を Fig. 3 に示す。图中薄青色で示す区間が下り坂路である。また, 本シミュレーション条件では時間制約は $t_f - t_0 = 24.72$ s である。

従来法 1 は, 一定減速度で減速するので, 坂路区間において大きな制動力を必要とする。(16) より, 銅損は制駆動力の2乗に比例するので大きな制動力を出すことは銅損の増加に繋がる。そのため, 坂路区間において効率の悪い回生動作をしている。

従来法 2 は, 平地を走行した際に消費エネルギーが最少となる速度軌道である。走行抵抗によって運動エネルギーが失われるのを防ぐため, 従来法 1 と比較して早い段階で減速する速度軌道が得られる。しかしながら, 実際には勾配路を走行するため, 従来法 1 と同様に坂路区間において大きな銅損を生じさせつつ, 回生をしている。従来法 1 と比較すると, 坂路区間を走行する時間が 6.42 % 増加したため, Fig. 3(f) に示すように, 坂路区間における銅損が 2.51 % 増加している。そのため, 従来法 1 よりも回生エネルギーが 2.72 % 減少している。

提案法 1 では, 走行抵抗による損失を抑制するため, 最初の

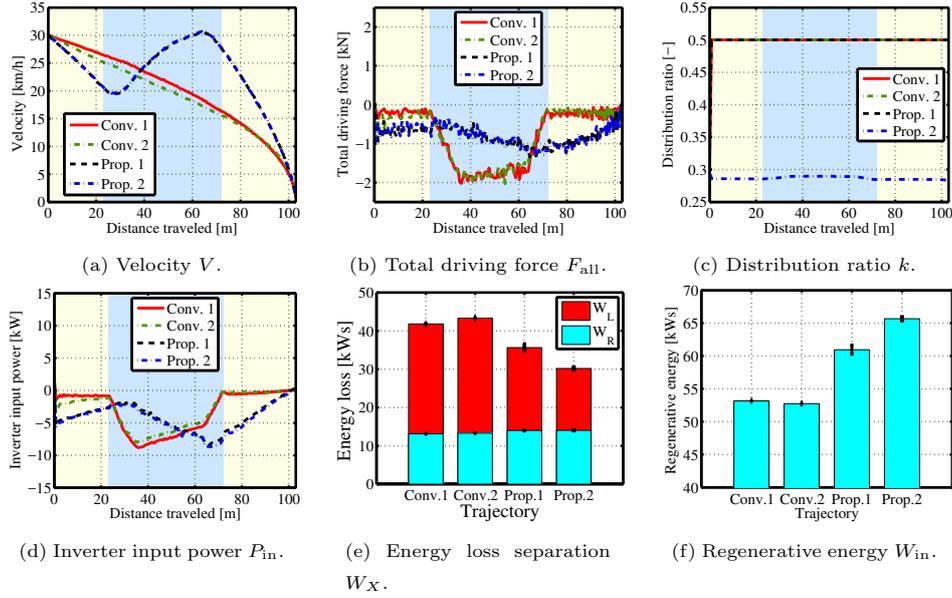


Fig. 4 Experimental results (Slope).

平地区間において従来法 1, 2 より大きく減速する。一方で、坂路区間では大きな銅損が発生しないよう小さな制動力を出して回生しつつ、加速することで位置エネルギーを運動エネルギーに変換している。最後の平地区間においては、最初の平地区間同様、早い段階で速度を大きく落とすことで、走行抵抗による損失を抑圧し、定められた時間経過後に停車する。勾配情報を考慮して速度軌道を最適化することで、Fig. 3(h) に示すように、銅損を大きく抑圧することが可能となる。

提案法 2 では、前後輪駆動力配分比を最適化することで、モータ損失を抑圧できていることが確認できる。本研究で使用したモータは後輪と比較して、前輪が全ての領域で高効率なため、 k_{opt} が 0.3 付近でほぼ一定となったが、効率特性の良い領域が異なるモータを前後に搭載することで、走行条件によって配分比が大きく変動する結果が得られると考えられる。Fig. 3(d) より、従来法 1 と比較すると、提案法 1 では 16.3 %、提案法 2 では 20.0 % の回生エネルギーの向上を達成した。

本稿の条件では、坂路区間において 30 km/h 付近まで加速するような速度軌道が得られたが、これ以上の速度まで加速すると、走行抵抗による損失や、最後の平地区間において減速する際に生じる銅損の増加が考えられる。そのため、最適な速度軌道は主に走行抵抗、銅損のトレードオフで決定されるということができる。

3.4. 実験

シミュレーションと同様の条件で (株) 小野測器が所有する Real Car Simulation Bench(RC-S)⁽¹⁰⁾ によって実験を行った。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、勾配路や低 μ 路など、様々な路面状況化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。

台上試験においては、RC-S によって演算された車体速度を

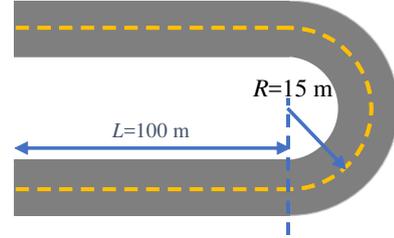


Fig. 5 Driving course.

フィードバックし、車体速度制御を行った。インバータ入力電力 P_{in} は、インバータ入力電圧 V_{dc} 、前後輪のインバータ入力電流の測定値 I_{dcj} を用いて次式より算出した。

$$P_{in} = V_{dc} \sum_{j=f,r} I_{dcj} \quad (36)$$

また、鉄損、銅損およびインバータ損失を含む損失 P_L は以下のように求めた。

$$P_L = P_{in} - P_{out} \quad (37)$$

ここで、機械出力 P_{out} は各輪の回転数の測定値 ω_{ij} 、トルクの推定値 T_{ij} を用いて次式で求めた。

$$P_{out} = \sum_{i=l,r} \sum_{j=f,r} \omega_{ij} T_{ij} \quad (38)$$

ただし、各変数の添え字 i には左輪、右輪を表す文字 l, r が入る。

Fig. 4 に実験結果を示す。各速度軌道につき 5 回ずつ測定を行った。総制駆動量、消費電力ともにシミュレーションと同様の傾向が得られた。このことから、台上試験において勾配路での走行を模擬できていることが確認できた。Fig. 4(f) より、従来法 1、従来法 2 と比較すると、提案法 1 では 14.7 %、提案法 2 では 23.5 % の回生エネルギーの向上を達成した。

4. 旋回路における航続距離延長自動運転

本章では、Fig. 5 のような旋回を含む経路を想定し、速度軌道を最適化することで消費エネルギーの削減を行う。速度軌道最適化による効果を検証するため、前後輪駆動力配分比 $k = 0.5$ として最適化された速度軌道を導出した。

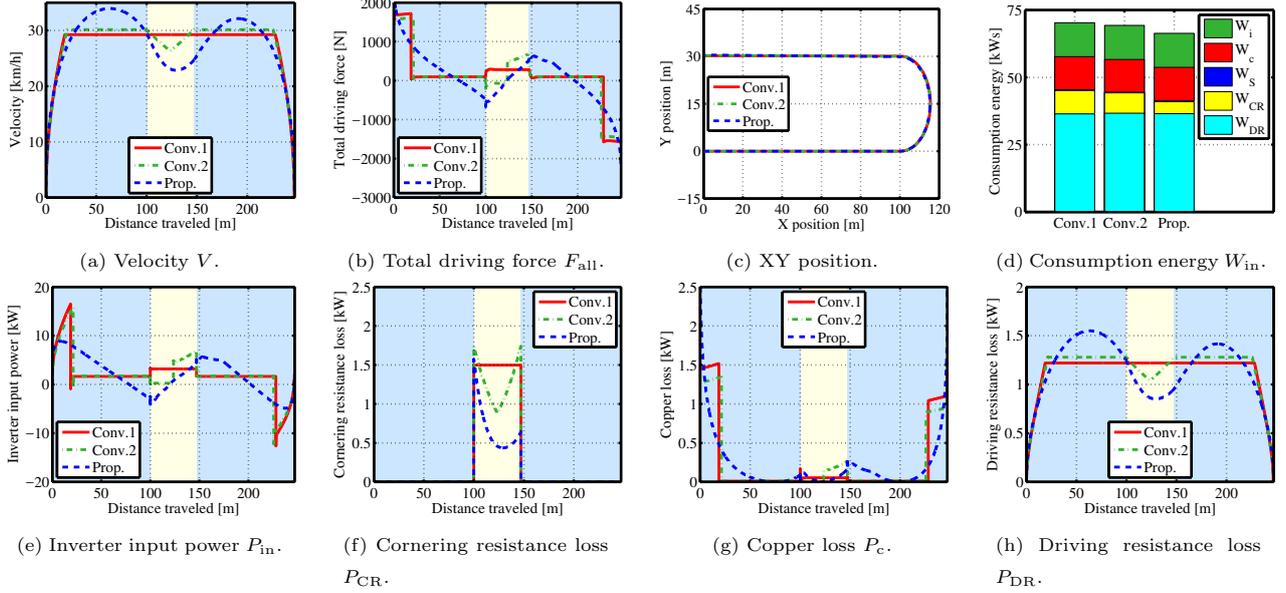


Fig. 6 Simulation results (Corner).

4.1. 比較条件

走行時間 $t_f - t_0$ を 35.0 s とし、以下の 3 通りの比較条件で最適化計算を行う。

従来法 1 一定加速度 a_x で加速した後、一定速度 V_{\max} で走行し、一定加速度 $-a_x$ で減速する速度軌道を考える。(39) 式で表される速度軌道のうち、旋回を考慮した際に消費エネルギーが最少となるよう a_x を最適化する。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 + a_x t & (t_0 < t < t_1) \\ V_{\max} & (t_1 < t < t_2) \\ V_{\max} - a_x t & (t_2 < t < t_f) \end{cases} \quad (39)$$

ここで、

$$t_1 = \frac{V_{\max} - V_0}{a_x} + t_0 \quad (40)$$

$$t_2 = t_f - \frac{V_{\max} - V_f}{a_x} \quad (41)$$

である。

従来法 2 一定加速度 a_x で加速した後、一定速度 V_{\max} で走行し、コーナー開始地点からコーナー中間地点まで走行抵抗とコーナリング抵抗のみで減速し、それ以降は速度軌道を時間軸に対象に折り返した速度軌道を考える。(42) 式で表される速度軌道のうち、旋回を考慮した際に消費エネルギーが最少となるよう a_x を最適化する。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 + a_x t & (t_0 < t < t_1) \\ V_{\max} & (t_1 < t < t_2) \\ V_{\max} - \frac{1}{M} \int_{t_2}^t (F_{DR}(V) + F_{CR}(V, R)) dt & (t_2 < t < t_3) \\ V(2t_3 - t) & (t_3 < t < t_f) \end{cases} \quad (42)$$

ここで、

$$t_1 = \frac{V_{\max} - V_0}{a_x} + t_0 \quad (43)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{1}{V_{\max}} \left(L - \frac{V_{\max}^2 - V_0^2}{2a_x} \right) \quad (44)$$

$$t_3 = \frac{t_f + t_0}{2} \quad (45)$$

である。

提案法 以下の非線形最適制御問題を数値的に解き、導出された速度軌道で走行する。

$$\min. \quad W_{\text{in}} = \int_{t_0}^{t_f} P_{\text{in}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \quad (46)$$

$$\text{s.t.} \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{M} [F_{\text{all}} - \text{sgn}(V)(F_{\text{DR}}(V) + F_{\text{CR}}(V, R))] \\ V(t) \\ -\frac{2(C_f + C_r)}{MV} \beta - \left(\frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{MV^2} - 1 \right) \gamma \\ + \frac{2C_f}{MV} \delta_f \\ -\frac{2(l_f C_f + l_r C_r)}{I} \beta - \frac{2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{IV} \gamma \\ + \frac{2l_f C_f}{I} \delta_f \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\chi(\mathbf{x}(t_0)) = \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 = \mathbf{0} \quad (48)$$

$$\psi(\mathbf{x}(t_f)) = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f = \mathbf{0} \quad (49)$$

ここで、

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \\ \beta(t) \\ \gamma(t) \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} F_{\text{all}}(t) \\ \delta_f(t) \end{bmatrix} \quad (51)$$

である。また、 \mathbf{x}_0 は初期条件、 \mathbf{x}_f は終端条件である。数値計算をするに辺り、定常円旋回を仮定し、 $\delta_f(t)$ は速度が決まれば一意に定まるものとして取り扱う。そのため、本稿では F_{all} のみを最適化する。

4.2. シミュレーション

Fig. 6 にシミュレーション結果を示す。従来法 2 では、コーナー入り口からコーナー中間地点まで駆動力を出さないため、従来法 1 と比較して旋回中の速度が低くなっている。(7) 式より、コーナリング抵抗は速度 V の 4 乗に比例するため、Fig. 6(d) に示すように、コーナリング抵抗による損失 W_{CR} が従来法 1 と比較して 13.2% 削減されている。そのため、従来法 1

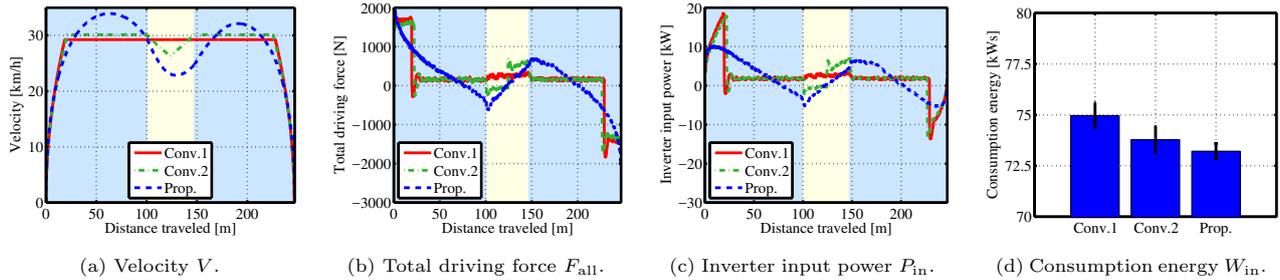


Fig. 7 Experimental results (Corner).

と比較して、消費エネルギーが 1.45 % 削減されている。

提案法では、従来法よりも高い速度まで加速した後に、コーナー手前から減速を開始し、コーナー出口付近から再加速する特徴的な速度軌道が得られた。提案法の速度軌道は、従来法 1 と比較して旋回中の速度が更に低くなっている。そのため、従来法 1 と比較して、Fig. 6(d) に示すように、コーナリング抵抗による損失 W_{CR} が 49.0 % 削減されている。旋回中の速度を更に下げると、コーナリング抵抗による損失の削減率は更に大きくなるものの、時間制約があるため、最高速度、最大加減速度が大きくなり、銅損、走行抵抗による損失が増加する。本稿で最適化を行った条件では、加減速度の最大値が従来法 1 と比較して 51.0 % 大きくなっているものの、大きな駆動力を出して走行する時間が短いため、銅損 W_c の増加は 1.53 % に留まっている。また、最高速度は従来法 1 と比較して 16.1 % 増加しているものの、旋回中の速度が従来法よりも低いこともあり、走行抵抗による損失 W_{DR} の増加は 0.57 % と小さな値となっている。提案法では、銅損、走行抵抗による損失の増加量と比較して、コーナリング抵抗による損失の削減量が十分に大きいため、従来法 1 と比較して消費エネルギーが 5.63 % 削減されている。

4.3. 実験

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。実験においては、4 輪の車輪速の平均値を車体速として用いて、速度制御を行った。また、マーカにより与えられた経路に追従するように手で操舵を行った。

実験結果を Fig. 7 に示す。測定は、それぞれの条件に対して 5 回ずつ行った。Fig. 7(b) より、総制駆動力 F_{all} はシミュレーション結果とよく一致しており、走行抵抗、コーナリング抵抗のモデルの妥当性が示された。また、Fig. 7(c) より、消費電力は加減速時にシミュレーションと僅かにズレがあるものの、概ねシミュレーション結果と一致している。Fig. 7(d) より、従来法 1 と比較して、従来法 2 では 1.58 %、提案法では 2.33 % の消費エネルギー削減を達成した。シミュレーションと比較して、消費電力の削減率が低下している原因として、前述の消費電力のモデル化誤差の影響があげられる。

5. 結論

本稿では、航続距離延長自動運転システムとして、道路形状を考慮して速度軌道を最適化する航続距離延長自動運転 (READ) を提案した。勾配路では、下り勾配において無理に減速しないことで、銅損を抑圧することができる。また、旋回路においては、旋回中の速度を抑えることで、コーナリング抵抗による損失を抑圧することができる。最適な速度軌道は主に銅損、走行抵抗、コーナリング抵抗のトレードオフによって定まることを確認した。シミュレーションおよび台上試験、実走行試験によ

り提案法の有効性を確認した。本稿で提案したシステムでは予め速度軌道を導出して実装していたため、今後の課題として、提案するシステムのリアルタイム化が挙げられる。

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)、文部科学省科学研究費補助金 (課題番号:22246057 及び 26249061)、及び JST-CREST プロジェクト “エネルギー消費行動の観測と分散蓄電池群の協調的利用に基づく車・仮定・地域調和型エネルギー管理システム” 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) 佐藤隆之, 新富将克, 瀬尾直英: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).
- (3) 松本大樹, 西原修: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, 日本機械学会第 20 回交通・物流部門大会講演論文集, No.11-59, pp.63-66 (2011).
- (4) 小林孝雄, 勝山悦生, 杉浦豪軌, 小野英一, 山本真規:旋回時の駆動力配分制御と消費エネルギーに関する研究 (第 2 報) 定常円旋回から準定常円旋回への拡張, 自動車技術会 2015 年春季大会, pp. 795-800 (2015).
- (5) 中嶋嶋二, 小山亮, 水貝智洋, 松岡大輔, 狩野野郎, 安部正人:すべりによるタイヤ消費エネルギーに及ぼすタイヤ力配分制御の効果, 自動車技術会 2013 年春季大会, No.30-13, pp. 21-24 (2013).
- (6) 藤本博志, 原田信吾, 郡司大輔, 後藤雄一, 川野大輔, 佐藤宏治, 松尾裕介:駆動力最適配分による電気自動車の航続距離延長制御の実走行および台上試験, 自動車技術会 2014 年春季大会, No.28-14, pp.17-20 (2014).
- (7) 木村浩章, 大竹宏忠, 小栗春紀, 兼松昌寿:公道におけるグリーンウェア走行支援システムの効果評価実験結果, 自動車技術会 2012 年秋季大会, No.87-12, pp.15-18 (2012).
- (8) H. Yoshida, H. Fujimoto, D. Kawano, Y. Goto, M. Tsuchimoto, K. Sato: Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles Based on Optimal Velocity Trajectory and Driving Braking Force Distribution Considering Road Gradient Information, 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.4754-4759 (2015).
- (9) 池澤佑太, 藤本博志, 川野大輔, 後藤雄一, 榎本みさき, 佐藤宏治:電気自動車における旋回を考慮した速度軌道最適化による航続距離延長自動運転制御の基礎検討, 機械学会第 24 回交通・物流部門大会講演論文集, No.15-63 (2015).
- (10) 川野大輔, 後藤雄一, 越後賢太郎, 佐藤宏治:Real Car Simulation Bench (RC-S) による実走行条件の燃費・排出ガス挙動解析, 自動車技術会 2009 年春季大会, No.19-9, pp.9-12 (2009).