

3109 電気自動車における駆動力差モーメントを考慮した航続距離延長自動運転

Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicle Based on Optimization of Velocity Profile in Consideration of Direct Yaw Moment

○ 池澤 佑太 (東京大学大学院) 藤本 博志 (東京大学大学院)
川野 大輔 (交通安全環境研究所) 後藤 雄一 (交通安全環境研究所)
武田 雄資 (小野測器) 佐藤 宏治 (小野測器)

Yuta Ikezawa, Hiroshi Fujimoto, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba
Daisuke Kawano, Yuichi Goto, National Traffic Safety and Environment Laboratory
Yusuke Takeda, Koji Sato, Ono Sokki Co.,Ltd.

Intelligent Transport System (ITS) has been intensively studied in the last decade to solve environmental and energy problem by improving traffic flow. Along with the development of ITS and autonomous driving technologies, vehicle velocity will be decided by ITS. In this paper, range extension autonomous driving (READ) system which minimizes consumption energy for electric vehicle (EV) is proposed. The proposed method optimizes velocity profile and direct yaw moment simultaneously in consideration of cornering. The effectiveness of the proposed method is verified by simulations and experiments.

Key Words: electric vehicle, range extension autonomous driving, cornering resistance, direct yaw moment, motor loss, nonlinear optimal control

1 はじめに

近年、地球温暖化や化石燃料の枯渇などの環境問題が顕在化してきているが、これらの問題を解決するために様々な研究が行われている。解決策の一つとして、環境負荷の少ない電気自動車 (Electric Vehicle: EV) に注目が集まっている。環境面だけでなく、EV は従来の内燃機関を有する自動車と比べて、以下の4つの優位点を持つ⁽¹⁾。

1. トルク応答が2桁速い。
2. モータに流れる電流を測定することで、トルクを正確に把握できる。
3. 小型高出力であるため、分散配置が可能である。
4. 力行だけでなく回生が可能である。

以上のように、多くの利点があるEVだが、一充電走行距離が短いという課題のため、広く普及していないのが現状である。この課題を解決するために、損失の少ないモータの設計に関する研究⁽²⁾やチョップを用いたドライブシステムの高効率化を図った研究⁽³⁾、路面から走行中の車両へワイヤレスで給電を行う研究⁽⁴⁾などが行われている。

一方で、高度道路交通システム (Intelligent Transport Systems: ITS)⁽⁵⁾を活用して、交通流を改善することでエネルギー問題を解決しようとする研究もある。これらの研究では、前後の車の情報を利用した隊列走行⁽⁶⁾や仮想的な信号⁽⁷⁾の導入によって交通流の改善が図られている。今後、ITSがさらに進展していき、全ての車両が自動運転に移行していくことを考えると、ドライバーではなく、ITSが速度軌道を決定するという前提で研究を行う必要があ

る。車両の速度がITSによって決定されるようになれば、速度軌道の最適化によって消費エネルギーの最小化が可能となる。著者らのグループでは、ITSから信号や勾配、旋回半径等の道路情報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航続距離を延長する航続距離延長自動運転 (Range Extension Autonomous Driving: READ) に関する研究を行ってきた^(8,9)。文献⁽⁹⁾では、旋回路を想定し、タイヤの横滑りによって生じるコーナリング抵抗をモデル化した上で、速度軌道を最適化することで航続距離延長を達成した。しかしながら、インホイールモータ (IWM) 搭載車両を想定すれば、車両速度に加えて、左右の駆動力配分にも自由度が存在する。左右の駆動力差モーメントによって、コーナリング抵抗、消費電力が削減可能であることはよく知られており⁽¹⁰⁾、本稿では車両速度、左右駆動力差モーメントの同時最適化によって航続距離を更に延長する手法を提案する。また、シミュレーション及び実験によって、提案法の有効性を示す。

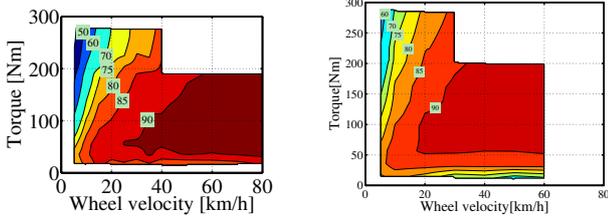
2 実験車両と車両モデル

本章では、実験車両について紹介する。また、車両の運動モデル、消費電力モデルについて説明する。

2.1 実験車両 本稿では、著者らのグループが作成した実験車両 FPEV2-Kanon を使用した。図1に車両の外観を示す。この車両は4輪に東洋電機製造製アウトロータ型 IWM を搭載しており、各輪独立駆動が可能である。また、このモータはダイレクトドライブ方式であるので、減速ギアのバックラッシュによる影響がなく、路面からの力が直接モータへ伝わる。このモータの効率特性は図2に示すよ



Fig.1 FPEV2-Kanon.



(a) Front motor. (b) Rear motor.
Fig.2 Efficiency maps of front and rear motors.

Table.1 Vehicle specification.

Vehicle mass M	854 kg
Wheelbase l	1.72 m
Distance from center gravity to front and rear axle l_f, l_r	l_f :1.01 m l_r :0.702 m
Gravity height h_g	0.510 m
Front wheel inertia J_{ω_f}	1.24 kg·m ²
Rear wheel inertia J_{ω_r}	1.26 kg·m ²
Wheel radius r	0.302 m
Front cornering stiffness C_f	12.5 kN/rad
Rear cornering stiffness C_r	29.2 kN/rad

Table.2 Specification of in-wheel motors.

	Front	Rear
Manufacturer	TOYO DENKI SEIZO K.K.	
Type	Direct Drive System	
Rated torque	110 Nm	127 Nm
Maximum torque	500 Nm	530 Nm
Rated power	6.00 kW	6.00 kW
Maximum power	20.0 kW	25.0 kW
Rated speed	382 rpm	450 rpm
Maximum speed	1110 rpm	1200 rpm

うに前後輪で異なるので、速度、駆動力に応じて前後輪に最適に駆動力を配分することで消費電力の削減が可能となる。これに加えて、前後輪アクティブ操舵が可能であるので、車両横滑り角とヨーレートを独立に制御することが可能である。

2.2 車両の運動モデル 本節では前後輪操舵、後輪2輪独立駆動が可能な自動車の運動モデルについて述べる。

2.2.1 車両の運動方程式 本稿では図3に示す2輪車両モデルで車両の運動を考える。車輪回転方向の運動方程式は(1)式、車両前後方向の運動方程式は(2)式、横方向の運動方程式は(3)式、ヨー方向の運動方程式は(4)式、左右の駆動力差モーメントは(5)式で表される。

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

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

$$M a_y = MV(\dot{\beta} + \gamma) \approx 2Y_f + 2Y_r \quad (3)$$

$$I \dot{\gamma} = (F_{yfl} + F_{yfr})l_f - (F_{yrl} + F_{yrr})l_r + N_z \approx 2(l_f Y_f - l_r Y_r) + N_z \quad (4)$$

$$N_z = \frac{d_r}{2}(-F_{xrl} + F_{xrr}) \quad (5)$$

ここで、 J_{ω_i} は車輪のイナーシャ、 ω_{ij} は車輪角速度、 T_{ij} は車輪軸周りのトルク、 r はタイヤ半径、 F_{xij} は一輪当たりの制駆動力、 M は車体重量、 V は車体速、 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_i は各輪の横力、 I は車体のイナーシャ、 F_{yij} は各輪のコーナリングフォース、 l_i は車両重心点から前後駆動点までの距離、 d_i は前後のトレッド幅である。また、添え字の*i*には前輪、後輪を示す*f*, *r*, 添え字の*j*には左輪、右輪を示す*l*, *r*が入る。走行抵抗 F_{DR} は以下の式で表される。

$$F_{\text{DR}}(V) = \mu_0 M g + b|V| + \frac{1}{2} \rho C_d S V^2 \quad (6)$$

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、 S は前方投影面積である。

また、左右駆動力配分比 k を導入すると、各輪の駆動力は(7)式、駆動力差モーメントは(9)式で表される。

$$F_{x r j} = \gamma_j(k) F_{\text{all}} \quad (7)$$

$$\gamma_j(k) = \begin{cases} 1 - k & (j = l) \\ k & (j = r) \end{cases} \quad (8)$$

$$N_z = \frac{1}{2} d_r (-1 + 2k) F_{\text{all}} \quad (9)$$

2.2.2 横力とコーナリング抵抗 次に、タイヤ横力、コーナリング抵抗のモデル化を行う。前輪に加わる横力、コーナリング抵抗を図4に示す。コーナリングフォースは車輪横滑り角に比例するので、以下の式で表される。

$$F_{y i} = -C_i \alpha_i \quad (10)$$

ここで、 C_i は各輪のコーナリングスティフネス、 α_i は各輪の車輪横滑り角である。車輪横滑り角が十分に小さければ、コーナリングフォースとタイヤ横力 Y_i は等しいとみなせる。

$$Y_i \simeq F_{y i} = -C_i \alpha_i \quad (11)$$

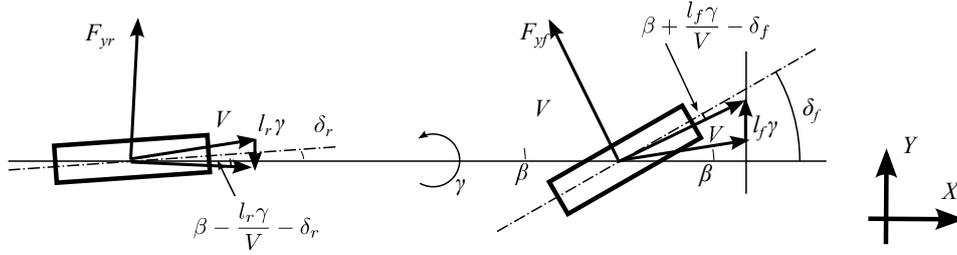


Fig.3 Bicycle model of vehicle dynamics.

各輪のタイヤ横力のうち、車輪進行方向成分を F_{CR}' とすると

$$F_{CR}' \simeq -2F_{yf} \sin \alpha_f - 2F_{yr} \sin \alpha_r \quad (12)$$

$$\simeq 2C_f \alpha_f^2 + 2C_r \alpha_r^2 \quad (13)$$

となる。このうち、 x 方向の力のみをコーナリング抵抗 F_{CR} とすると以下のようになる。

$$F_{CR} \simeq 2C_f \alpha_f^2 \cos \delta_f + 2C_r \alpha_r^2 \cos \delta_r \quad (14)$$

$$\simeq 2C_f \alpha_f^2 + 2C_r \alpha_r^2$$

ここで、 δ_i は前後輪の実舵角であり、車輪横滑り角 α_f , α_r は幾何学的関係から以下の式で表される。

$$\alpha_f(V, \beta, \gamma, \delta_f) = \beta + \frac{l_f \gamma}{V} - \delta_f \quad (15)$$

$$\alpha_r(V, \beta, \gamma, \delta_r) = \beta - \frac{l_r \gamma}{V} - \delta_r \quad (16)$$

ここで、旋回半径 R の定常円旋回 ($\dot{\beta} = 0$, $\dot{\gamma} = 0$) を仮定すると、コーナリング抵抗 F_{CR} は (17) 式で近似できる。

$$F_{CR}(V, R, N_z) \simeq \frac{M^2}{2l^2} \left(\frac{l_r^2}{C_f} + \frac{l_f^2}{C_r} \right) \frac{V^4}{R^2} \quad (17)$$

$$+ D_c N_z^2 - \frac{1 + 2AV^2}{R} N_z$$

ここで、 D_c は以下の式で表される定数である。

$$D_c = \frac{C_f + C_r}{2l^2 C_f C_r} \quad (18)$$

2.2.3 スリップ率 次に、スリップ率 λ_{ij} を定義する。各車輪位置における車体速度 V_{ij} は

$$V_{ij} = V + \text{sgn}(j) \frac{d_i}{2} \gamma \quad (19)$$

で表される。ここで、 sgn は符号関数で、

$$\text{sgn}(j) = \begin{cases} -1 & (j=l) \\ 1 & (j=r) \end{cases} \quad (20)$$

である。車輪速 $V_{\omega_{ij}} = r\omega_{ij}$ 、各車輪位置における車体速 V_{ij} を用いて、スリップ率を (21) 式で定義する。

$$\lambda_{ij} = \frac{V_{\omega_{ij}} - V_{ij}}{\max(V_{\omega_{ij}}, V_{ij}, \epsilon)} \quad (21)$$

ここで、 ϵ は零割防止のための微小定数である。スリップ率 λ_{ij} が十分に小さければ、図 5 のように摩擦係数 μ_{ij} は

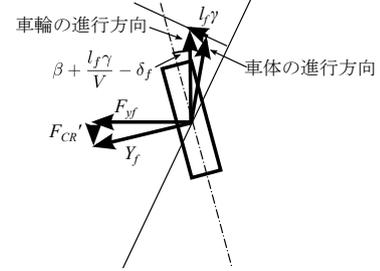


Fig.4 Cornering resistance of front tyre.

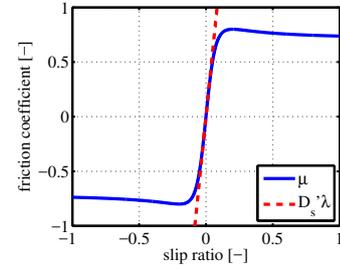


Fig.5 μ - λ curve⁽¹¹⁾.

ほぼ λ_{ij} に比例する⁽¹¹⁾。この傾きをドライビングステイフネス D_s' と定義すると、一輪あたりの制駆動力 F_{xij} は (22) 式で表される。

$$F_{xij} = \mu_{ij} N_{zij} \simeq D_s' N_{zij} \lambda_{ij} \quad (22)$$

ここで、 N_{zij} は車両が前後加速度 a_x 、横加速度 a_y で運動しているときの車輪あたりの垂直抗力であり、(23)–(26) 式で表される。

$$N_{zfl} = \frac{1}{2} \frac{l_r}{l} Mg - \frac{1}{2} \frac{h_g}{l} Ma_x - \rho_f \frac{h_g}{d_f} Ma_y \quad (23)$$

$$N_{zfr} = \frac{1}{2} \frac{l_r}{l} Mg - \frac{1}{2} \frac{h_g}{l} Ma_x + \rho_f \frac{h_g}{d_f} Ma_y \quad (24)$$

$$N_{zrl} = \frac{1}{2} \frac{l_f}{l} Mg + \frac{1}{2} \frac{h_g}{l} Ma_x - \rho_r \frac{h_g}{d_r} Ma_y \quad (25)$$

$$N_{zrr} = \frac{1}{2} \frac{l_f}{l} Mg + \frac{1}{2} \frac{h_g}{l} Ma_x + \rho_r \frac{h_g}{d_r} Ma_y \quad (26)$$

ここで、 h_g は重心高、 ρ_i はロール剛性前後配分比である。

2.3 入力電力モデル モータの機械損、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 (27) 式で表される (12)。

$$P_{in} = P_{out} + P_c + P_1 \quad (27)$$

ここで、 P_{out} は各モータの機械出力の和、 P_c は各モータの銅損の和、 P_1 は各モータの鉄損の和である。

まず、機械出力のモデル化を行う。車輪の慣性力によるトルクは十分小さく、スリップ率 λ_{rj} も小さいとすると、車軸周りのトルク T_{rj} 、車輪角速度 ω_{rj} は以下の式で表される。

$$T_{rj} \simeq rF_{rj} \quad (28)$$

$$\omega_{rj} \simeq \frac{V_{rj}}{r}(1 + \lambda_{rj}) \quad (29)$$

従って、機械出力 P_{out} は (30) 式で表される。

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= \sum_{j=l,r} \omega_{rj} T_{rj} \\ &\simeq VF_{\text{all}} \sum_{j=l,r} (1 + \text{sgn}(j) \frac{d_r}{2R}) \\ &\quad \left(1 + \frac{\gamma_j(k) F_{\text{all}}}{D_s' N_{zrj}(F_{\text{all}}, k, V, R)} \right) \gamma_j(k) \quad (30) \end{aligned}$$

次に、モータ銅損のモデル化を行う。リラクタンストルクに比べてマグネットトルクが十分大きく、 q 軸電流が d 軸電流に比べて十分大きいとすると、モータ銅損 P_c は次式で示される。

$$\begin{aligned} P_c &= \sum_{j=l,r} R_r i_{qrj}^2 \\ &\simeq r^2 F_{\text{all}}^2 \sum_{j=l,r} \frac{R_r}{K_{\text{tr}}^2} \gamma_j(k)^2 \quad (31) \end{aligned}$$

ここで、 R_r はモータの電機子巻線抵抗、 i_{qrj} は q 軸電流、 K_{tr} はトルク定数である。

次に、モータ鉄損のモデル化を行う。 d 軸電機子反作用が永久磁石に依る速度起電力に比べて十分に小さいとして無視し、スリップ率 λ_{rj} も十分に小さいとして無視すると、モータ鉄損 P_i は次式で示される。

$$\begin{aligned} P_i &= \sum_{j=l,r} \frac{v_{odrj}^2 + v_{oqrj}^2}{R_{crj}} \\ &= \sum_{j=l,r} \frac{\omega_{erj}^2}{R_{crj}} \left\{ (L_{dr} i_{odrj} + \Psi_r)^2 + (L_{qr} i_{oqrj})^2 \right\} \\ &\simeq \frac{V^2}{r^2} \sum_{j=l,r} \frac{P_{nr}^2}{R_{crj}} (1 + \text{sgn}(j) \frac{d_r}{2R}) \\ &\quad \left\{ \left(\frac{r L_{qr} \gamma_j(k) F_{\text{all}}}{K_{\text{tr}}} \right)^2 + \Psi_r^2 \right\} \quad (32) \end{aligned}$$

ここで、 v_{odrj} 、 v_{oqrj} はそれぞれ dq 軸の誘起電圧、 R_{crj} は等価鉄損抵抗、 ω_{erj} はモータの電気角速度、 L_{dr} は d 軸インダクタンス、 L_{qr} は q 軸インダクタンス、 i_{odrj} 、 i_{oqrj} はそれぞれ dq 軸電流と銅損電流の dq 軸成分の差、 P_{nr} は極対数、 Ψ_r は磁束鎖交数である。等価鉄損抵抗 R_{crj} は (33) 式で表される。

$$\frac{1}{R_{crj}(\omega_{erj})} = \frac{1}{R_{c0j}} + \frac{1}{R_{c1j} |\omega_{erj}|} \quad (33)$$

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。

3 消費エネルギー-最初速度軌道の導出

3.1 定式化 初期条件、終端条件を満たしつつ、消費エネルギー W_{in} を最小とする速度軌道 $V(t)$ 、左右駆動力配分比 $k(t)$ を求める。よって、評価関数、拘束条件は以下のようになる。

$$\min. \quad W_{\text{in}} = \int_{t_0}^{t_f} P_{\text{in}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \quad (34)$$

$$\text{s.t.} \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \chi(\mathbf{x}(t_0)) &= \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 \\ &= \begin{bmatrix} V(t_0) - V_0 \\ X(t_0) - X_0 \\ \beta(t_0) - \beta_0 \\ \gamma(t_0) - \gamma_0 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (36) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{x}(t_f)) &= \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f \\ &= \begin{bmatrix} V(t_f) - V_f \\ X(t_f) - X_f \\ \beta(t_f) - \beta_f \\ \gamma(t_f) - \gamma_f \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (37) \end{aligned}$$

ここで、

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \\ \beta(t) \\ \gamma(t) \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} a_x(t) \\ k(t) \\ \delta_f(t) \\ \delta_r(t) \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) = \begin{bmatrix} a_x(t) \\ V(t) \\ -\frac{2(C_f + C_r)}{MV} \beta - \left(\frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{MV^2} - 1 \right) \gamma \\ + \frac{2C_f}{MV} \delta_f + \frac{2C_r}{MV} \delta_r \\ -\frac{2(l_f C_f + l_r C_r)}{I} \beta - \frac{2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I} \gamma \\ + \frac{2l_f C_f}{I} \delta_f - \frac{2l_r C_r}{I} \delta_r \end{bmatrix} \quad (40)$$

である。以上の最適制御問題を勾配法⁽¹³⁾を用いて解くことで、消費エネルギーを最小化する速度軌道、左右駆動力配分比を導出する。

但し、本稿では計算を簡易化するため

$$\beta = 0 \quad (41)$$

$$\gamma = \frac{V}{R} \quad (42)$$

とし、 a_x 、 k のみを最適化する。従って、状態変数、制御入力、状態方程式は以下のように書き直すことが出来る。

$$\mathbf{x}_1(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$\mathbf{u}_1(t) = \begin{bmatrix} a_x(t) \\ k(t) \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t) = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1(t), \mathbf{u}_1(t)) = \begin{bmatrix} a_x(t) \\ V(t) \end{bmatrix} \quad (45)$$

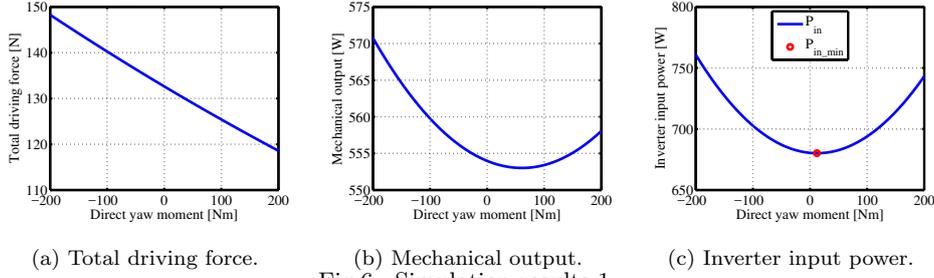


Fig.6 Simulation results 1.

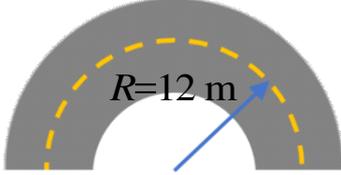


Fig.7 Course.

3.2 左右駆動力配分最適化法 本節では速度軌道と左右駆動力配分比の2変数の最適化問題が、速度軌道と左右駆動力配分比の1変数の最適化問題2つに分離できることを示す。まず、随伴変数を $\nu = [\nu_1 \ \nu_2]^T$ とし、(46)式でハミルトニアンを定義する。

$$H(x_1, u_1, \nu) = P_{in}(x_1, u_1) + \nu(t)^T f_1(x_1, u_1) \quad (46)$$

最適解が満たすべきオイラー・ラグランジュ方程式は、ハミルトニアンを用いて以下の式で表される。

$$\frac{\partial H}{\partial a_x} = \frac{\partial P_{in}}{\partial a_x} + \nu_1 = 0 \quad (47)$$

$$\frac{\partial H}{\partial k} = \frac{\partial P_{in}}{\partial k} = 0 \quad (48)$$

随伴変数が(48)式には含まれていないため、左右駆動力配分比に関しては(48)式を満たす配分比 k_{opt} を与えれば良い。最適解を求める際、 $V(t)$ ($t_0 \leq t \leq t_f$) に対して、常に k_{opt} を与えることで、数値計算の際の探索の次元を2次元から1次元に減らすことが出来る。

最適な左右駆動力配分比 k_{opt} を求めるに際し、まず、消費電力モデルから F_{all} を消去し、前後加速度 a_x で表すことを考える。(2), (7), (17)式より、総制駆動力は a_x , V , k , R の関数として表される。

$$\begin{aligned} Ma_x &= F_{all} - F_{DR} - F_{CR}(V, F_{all}, k) \\ &= F_{all} - F_{DR} - F_{CR}|_{k=0.5} - D_c \frac{d_r^2}{4} (-1+2k)^2 F_{all}^2 \\ &\quad + \frac{1+2AV^2}{R} \frac{d_r}{2} (-1+2k) F_{all} \end{aligned} \quad (49)$$

$$F_{all} \simeq \frac{2R(Ma_x + F_{DR} + F_{CR}|_{k=0.5})}{d_r(1+2AV^2)(-1+2k) + 2R} \quad (50)$$

よって、加速度 a_x で走行時のインバータ入力電力 P_{in} は以下のように、車体速 V , 左右輪駆動力配分比 k , 旋回半径 R の関数で表される。

$$\begin{aligned} P_{in}(V, a_x, k, R) &= P_{out}(V, a_x, k, R) + P_c(V, a_x, k, R) \\ &\quad + P_i(V, a_x, k, R) \end{aligned} \quad (51)$$

ここで、 $\frac{\partial P_{in}}{\partial k} = 0$ とすると、瞬間消費電力 P_{in} を最小化する左右輪駆動力配分比 k_{opt} が一意に求まる。

$$\begin{aligned} k_{opt} &= \frac{8AV^3 d_r R [2R - d_r(1+2AV^2)] + 8R^2 (Ma_x + F_{DR} - 16d_r^2 AV^3 R(1+2AV^2) + 8R^2 (Ma_x + F_{DR} + F_{CR}|_{k=0.5}) [2R + d_r(1+2AV^2)] [\frac{\omega_{rl}}{D_s N_{zrl}} + \frac{r^2 R_r}{K_{tr}^2} + F_{CR}|_{k=0.5} \sum_{j=l,r} [2R - \text{sgn}(j) d_r(1+2AV^2)] [\frac{\omega_{rj}}{D_s N_{zrj}} + (\frac{\omega_{rl} P_{nr} L_{qr}}{K_{tr}})^2 \frac{1}{R_{crj}}] + \frac{r^2 R_r}{K_{tr}^2} + (\frac{\omega_{rj} P_{nr} L_{qr}}{K_{tr}})^2 \frac{1}{R_{crj}}]]}{\dots} \end{aligned} \quad (52)$$

4 シミュレーション

4.1 駆動力差モーメントと消費電力 旋回半径 $R = 15$ m, 速度 $V = 15$ km/h にて旋回を行った場合の駆動力差モーメント N_z と総駆動力 F_{all} , 機械出力 P_{out} , 消費電力 P_{in} の関係を図6に示す。

図6(a)より、 N_z が大きくなるにつれて、コーナリング抵抗を削減できていることが確認できる。これに伴い必要な機械出力も減少するため、駆動力差モーメントを与えることで消費電力が低減される。一方で、ある値以上に N_z を大きくすると、コーナリング抵抗の削減による機械出力の削減量に比べて、1輪辺りの駆動力が増加することによる銅損の増加量が大きくなるので、消費電力が増加する。以上のことから、機械出力の減少と銅損の増加のトレードオフによって最適な左右駆動力配分比が決まるといえる。

4.2 比較条件 本稿では、図7のようなコースでの走行を考慮する。また、初期速度 V_0 , 終端速度 V_f をそれぞれ20 km/h, 走行時間 $t_f - t_0$ を8.0 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 一定減速度 $-a_x$ で減速した後、一定加速度 a_x で加速する速度軌道を考える。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 - a_x(t - t_0) & (t_0 < t < t_1) \\ V_0 + a_x(t - t_f) & (t_1 < t < t_f) \end{cases} \quad (53)$$

ここで、

$$a_x = \frac{E + \sqrt{E^2 + (t_f - t_0)^2 (V_f - V_0)^2}}{(t_f - t_0)^2} \quad (54)$$

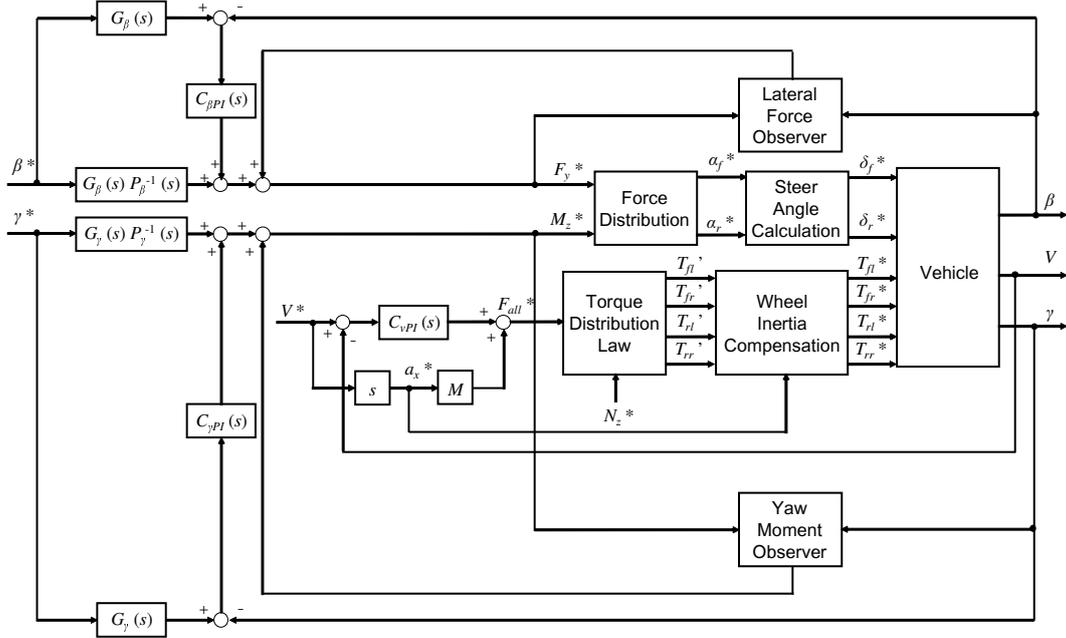


Fig.8 Control system.

$$t_1 = \frac{t_0 + t_f}{2} + \frac{V_0 - V_f}{2a_x} \quad (55)$$

$$E = -2(X_f - X_0) + (V_0 + V_f)(t_f - t_0) \quad (56)$$

である。

提案法 1 左右駆動力配分比 $k = 0.5$ として、速度軌道のみを最適化する。

提案法 2 左右駆動力配分比、速度軌道を同時に最適化する。

4.3 損失分離 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、(57)-(63) 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 、駆動力差モーメントに寄与する仕事 P_{N_z} に分離する。

$$P_{out} = P_M + P_J + P_{DR} + P_{CR} + P_S + P_{N_z} \quad (57)$$

$$P_M = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} MV^2 \right) \quad (58)$$

$$P_J = 2 \sum_{j=l,r} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega_r \omega_{rj}^2 \right) \quad (59)$$

$$P_{DR} = F_{DR} V \quad (60)$$

$$P_{CR} = F_{CR} V \quad (61)$$

$$P_S = F_{all} V \sum_{j=l,r} \left(1 + \text{sgn}(j) \frac{d_r}{2R} \right) \gamma_j(k) \lambda_{rj} \quad (62)$$

$$P_{N_z} = N_z \gamma \quad (63)$$

また、これらの積分値を以下のように定義する。

$$W_X = \int_{t_0}^{t_f} P_X(t) dt \quad (64)$$

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

4.4 速度軌道最適化 図 8 に示す制御系を用いて、 β, γ, V, N_z を制御し、シミュレーションを行った。駆動力差モーメントの指令値 N_z^* はオフラインで導出した F_{all}^* 、 k^* から (9) 式を用いて求めた。図 9 にシミュレーション結果を示す。

提案法 1 においては、早い段階で大きく減速することで、コーナリング抵抗による損失を 3.7 % 削減している。また、大きな駆動力を出す時間を削減することで、銅損が 23 % 削減されている。結果として、従来法と比較して 4.6 % の消費エネルギー削減を達成した。

提案法 2 においては、速度軌道は提案法 1 と殆ど変わらないものの、図 9(e) に示すように正の駆動力差モーメントを発生させている。これによって、コーナリング抵抗が僅かに減少するため、提案法 1 と比較するとコーナリング抵抗による損失が 6.4 % 減少している。一方で、駆動力差モーメントを発生させることで一輪辺りの駆動力が増加するため、銅損が 1.0 % 増加している。結果として、従来法と比較して 4.7 % の消費エネルギー削減を達成した。

5 実験

5.1 駆動力差モーメントと消費電力 シミュレーションと同様に旋回半径 $R = 15$ m、速度 $V = 15$ km/h にて旋回を行った場合の駆動力差モーメント N_z と総駆動力 F_{all} 、消費電力 P_{in} の関係を図 10 に示す。図中のバーは標準偏差を表す。なお、実験においては、インバータ入力電力 P_{in}

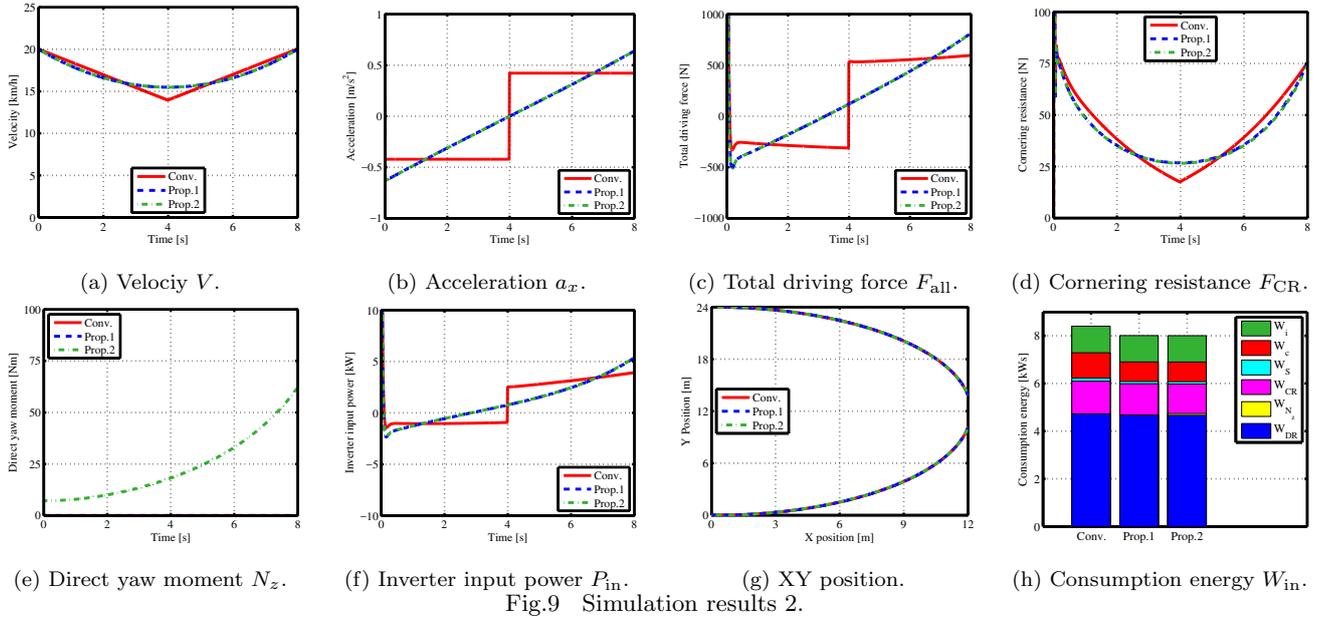


Fig.9 Simulation results 2.

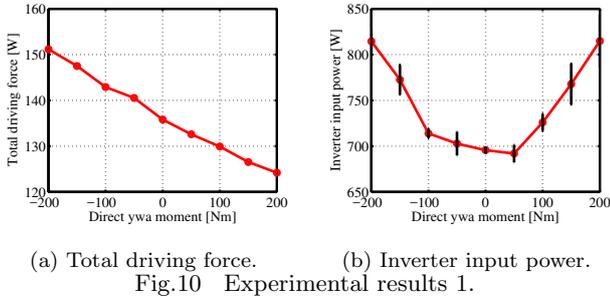


Fig.10 Experimental results 1.

は測定値を用いて次式で求めた.

$$P_{in} = V_{dc} \sum_{j=f,r} I_{dcrj} \quad (65)$$

ここで、 V_{dc} はインバータ入力電圧、 I_{dcrj} は左右輪のインバータ入力電流である。また、本稿では非駆動輪である前輪 2 輪の車輪速の平均値を車体速 V として用い、車両横滑り角 β は光学式センサを用いて取得した。図 10 より、駆動力、消費電力共にシミュレーションと同様の傾向が得られており、近似の妥当性が示された。

5.2 速度軌道最適化 シミュレーションと同様の条件で実験を行った。図 11 に実験結果を示す。測定はそれぞれの条件に対して 6 回ずつ行った。

従来法と比較して、提案法 1 で 8.1 %、提案法 2 で 9.1 % の消費電力削減を達成しており、シミュレーションと比較して改善率が大きくなっている。これは従来法において加速度が不連続に変化している時刻 ($t = 4$ s) から少しの間、速度制御系の影響で駆動力が上振れしており、これによって従来法の消費電力が悪化しているためであると考えられる。このことを確認するため、実験的に得られた各輪の角速度 ω_{rj} 、トルク T_{rj} から、消費電力モデルを用いて瞬間消費電力 P_{in} 、消費エネルギー W_{in} を計算した。その結果を図 12 に示す。図 12(b) より、計算値では、従来法と比

較して、提案法 1 で 5.0 %、提案法 2 で 5.3 % の消費電力削減となっており、従来法からの改善率はシミュレーション結果と近くなっている。このことから、 $t = 4$ s 付近での駆動力の上振れが従来法の消費電力の悪化に寄与しているということが出来る。しかしながら、消費電力の大きさで見ると、計算値は実験値よりも小さくなっており、これは消費電力のモデル化に際して、インバータ損失を無視しているためであると考えられる。この影響もあり、シミュレーションと比較して実験では消費電力が悪化していると考えられる。

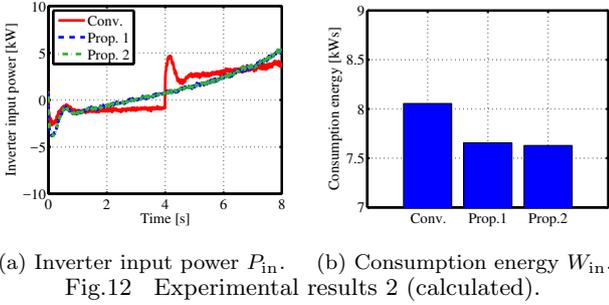
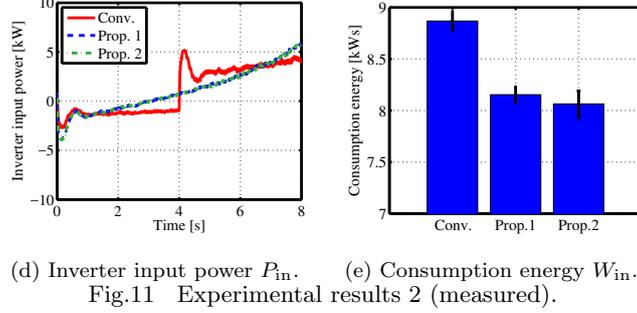
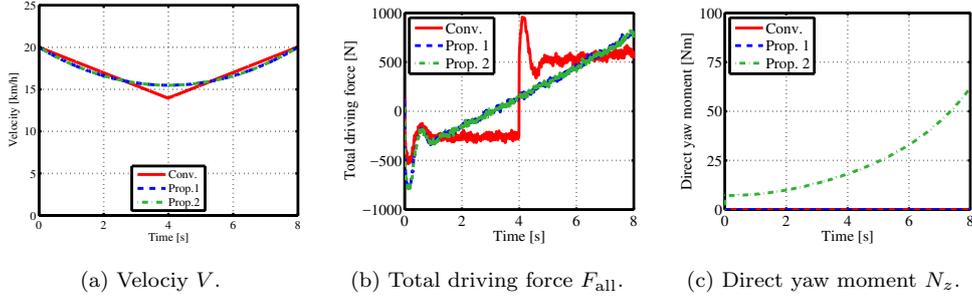
6 結論

本稿では、旋回路における駆動力差モーメントを考慮した航続距離延長自動運転を提案し、シミュレーション、実験によって効果の検証を行った。提案法を用いることで、速度軌道と左右駆動力差の 2 次元の探索問題を 1 次元の探索に変換することが可能である。従来法と比較して、提案法 1 で 8.1 %、提案法 2 で 9.1 % の消費電力削減を達成した。

従来の研究では、予め走行軌跡が定められている条件を考慮していたが、今後の方針として、車両追い越し時のように走行軌跡に自由度がある場合を考慮し、速度軌道に加えて走行軌跡についても同時に最適化することが挙げられる。

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 における研究課題 “エネルギー消費行動の観測と分散蓄電



池群協調の利用に基づく車・家庭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. on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 5, pp. 954–962 (2004).
- (2) D. Sato and J. Itoh: “Loss Minimization Design Using Permeance Method for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor”, IEEJ Trans. on Industry Applications, Vol. 135, No. 2, pp. 138–146 (2014).
- (3) Y. Hosoyamada, M. Takeda, T. Nozaki, N. Motoi, and A. Kawamura: “High Efficiency Series Chopper Power Train for Electric Vehicles Using a Motor Test Bench”, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 4, No. 4, pp. 460–468 (2015).
- (4) T. E. Stamati and P. Bauer: “On-road charging of Electric Vehicles”, Transportation Electrification Conference and Expo, Vol. 15, No. 2, pp. 1–8 (2013).
- (5) J. Zhang, F. Y. Wang, K. Wang, W. H. Lin, X. Xu, and C. Chen: “Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey”, IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, Vol. 12, No. 4, pp.1624–1639 (2011).
- (6) J. W. Kwon and D. Ghwa: “Adaptive Bidirectional Platoon Control Using a Coupled Sliding Mode Control Method”, Trans. on Intelligent Transport Systems, Vol. 15, No. 5, pp.2040–2048 (2014).
- (7) M. Ferreira and P. M. d’Orey: “On the Impact of Virtual Traffic Lights on Carbon Emissions Mitigation”, IEEE Trans. on Intelligent Transport Systems, Vol. 13, No. 1, pp. 284–295 (2002).
- (8) Y. Ikezawa, H. Fujimoto, Y. Hori, D. Kawano, Y. Goto, M. Tsuchimoto, and K. Sato: “Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles Based on Optimal Velocity Trajectory Generation and Front-Rear Driving-Braking Force Distribution”, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 5, No. 3, pp. 228–235 (2016).
- (9) 藤本博志, 吉田英樹, 池澤佑太, 川野大輔, 後藤雄一, 槌本みさき, 佐藤宏治: “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”, 自動車技術会 2016 年春季大会, pp. 385–390 (2016).
- (10) 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-定常円旋回における定式化と EV による検証-”, 自動車技術会 2014 年春季大会, No.70–13, pp. 9–14 (2014).
- (11) 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).
- (12) H. Fujimoto and S. Harada: “Model-Based Range Extension Control System for Electric Vehicles With Front and Rear Driving-Braking Force Distributions”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.62, No.5, pp.3245–3254 (2015).
- (13) 大塚敏之: “非線形最適制御入門”, コロナ社 (2011).