

# 電気自動車におけるエネルギー制約を考慮した 速度軌道最適化による最短時間自動運転制御

池澤 佑太\*, 藤本 博志 (東京大学),  
川野 大輔, 後藤 雄一 (交通安全環境研究所),  
槌本 みさき, 佐藤 宏治 (小野測器)

Minimum Time Autonomous Driving for Electric Vehicle Based on  
Optimization of Velocity Profile Considering Energy Constraint  
Yuta Ikezawa\*, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)  
Daisuke Kawano, Yuichi Goto (National Traffic Safety and Environment Laboratory)  
Misaki Tsuchimoto, Koji Sato (Ono Sokki Co.,Ltd.)

## Abstract

Intelligent Transport Systems (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, minimum time autonomous driving (MTAD) system which minimizes traveling time for electric vehicle (EV) is proposed. The proposed method optimizes velocity profile and front and rear driving-braking force distribution considering energy constraint, speed constraint, and driving-braking force constraint. The effectiveness of the proposed method is verified by simulation and bench test.

キーワード：電気自動車，速度軌道最適化，エネルギー制約，最短時間自動運転制御  
(electric vehicle, optimization of velocity profile, energy constraint, minimum time autonomous driving )

## 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。環境面に優れた EV であるが，更なる効率改善を目指して，損失の少ないモータの設計に関する研究<sup>(1)</sup> やチョップを用いたドライブシステムにおける高効率化を図った研究<sup>(2)</sup> 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)<sup>(3)</sup> 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<sup>(4)</sup> や仮想的な信号<sup>(5)</sup> を導入することによって交通流の改善が図られている。ITS がさらに進展すれば，全ての車両が自動運転に移行してゆくと考えられる。自動運転時代には，ITS が速度軌道を決定することが可能であり，これにより，時間制約下での航続距離最大化や，消費エネルギー制約下での移動時間最小化が可能となる。前者は通勤時など，指定時間までに目的地に到達したいが電池残量を残したい場合，後者は帰宅時など，電池残量を残す必要はないが，目的地まで可能な限り速く到達したい場合に有効である。著者らのグループでは，ITS から停止位置や勾配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<sup>(6)(7)</sup> が，エネルギー制約下での移動時間最小化は未検



Fig. 1 FPEV2-Kanon.

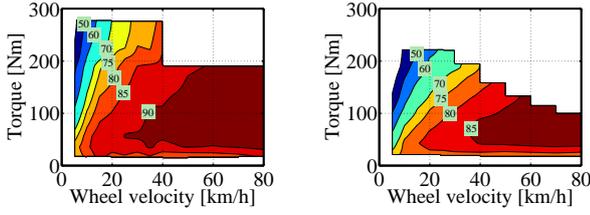
討課題である。

本稿では，自動運転を想定し，速度軌道を最適化することでエネルギー制約下での移動時間最小化を行う最短時間自動運転制御 (Minimum Time Autonomous Driving: MTAD) を提案する。本手法では，車両の運動及び消費電力をモデル化した上で最適制御問題を数値的に解くことで最適な速度軌道を求めることができる。シミュレーションおよび，台上試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。Fig. 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ターロータ型インホイールモータ (IWM) を搭載している。そのため，各輪



(a) Front motor. (b) Rear motor.

Fig. 2 Efficiency maps of front and rear motors.

Tab. 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 $h_g$	0.51 m
Front wheel inertia $J_{\omega_f}$	1.24 kg·m <sup>2</sup>
Rear wheel inertia $J_{\omega_r}$	1.26 kg·m <sup>2</sup>
Wheel radius $r$	0.302 m

Tab. 2 Specification of in-wheel motors.

	Front	Rear
Manufacturer	TOYO DENKI SEIZO K.K.	
Type	Direct Drive System	
Rated torque	110 Nm	137 Nm
Maximum torque	500 Nm	340 Nm
Rated power	6.00 kW	4.30 kW
Maximum power	20.0 kW	10.7 kW
Rated speed	382 rpm	300 rpm
Maximum speed	1110 rpm	1500 rpm

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。前後輪モータの効率特性を Fig. 2 に示す。本車両に搭載されている IWM は前後輪で効率特性が異なるので、前後輪の駆動力配分に自由度が存在する。

〈2・2〉 車両の運動モデル 本節では 4 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。本稿では直進走行のみを考慮するので、左右のトルクは等しい。車輪の回転運動方程式は (1) 式、車体の運動方程式は (2), (3) 式で表される。

$$J_{\omega_j} \dot{\omega}_j = T_j - rF_j \dots\dots\dots (1)$$

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

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

ここで、 $J_{\omega_j}$  は車輪のイナーシャ、 $\omega_j$  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、 $F_{\text{all}}$  は総制駆動力、 $\text{sgn}$  は符号関数、 $F_{\text{DR}}$  は走行抵抗である。また、添え字の  $j$  には前輪、後輪を示す  $f, r$  が入る。走行抵抗  $F_{\text{DR}}$  は (4) 式で表される。

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

ここで、 $\mu_0$  は転がり摩擦係数、 $b$  は  $V$  の一次に比例する抵抗係数、 $\rho$  は空気密度、 $C_d$  は抗力係数、 $A$  は前方投影面積である。

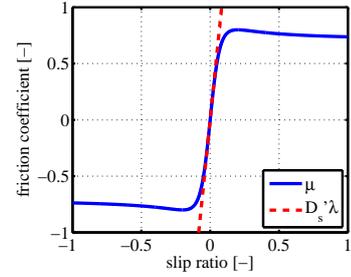


Fig. 3  $\mu$ - $\lambda$  Curve.

次に、スリップ率  $\lambda_j$  を車輪速  $V_{\omega_j} = r\omega_j$ 、車体速  $V$  を用いて (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、 $\epsilon$  は零割防止のための微小定数である。スリップ率  $\lambda_j$  が十分に小さければ、Fig. 3 のように摩擦係数  $\mu_j$  はほぼ  $\lambda_j$  に比例する<sup>(8)</sup>。この傾きをドライビングステイフネス  $D_s'$  と定義する。よって、一輪あたりの制駆動力  $F_j$  は (6) 式で表される。

$$F_j = \mu_j N_j \simeq D_s' N_j \lambda_j \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $N_j$  は車両が車体速  $V$ 、総制駆動力  $F_{\text{all}}$  で運動しているときの前後一輪当たりの垂直抗力であり、(7), (8) 式で表される。

$$N_f(V, F_{\text{all}}) = \frac{1}{2} \left[ \frac{l_r}{l} Mg - \frac{h_g}{l} \{F_{\text{all}} - \text{sgn}(V)F_{\text{DR}}(V)\} \right] \dots\dots\dots (7)$$

$$N_r(V, F_{\text{all}}) = \frac{1}{2} \left[ \frac{l_f}{l} Mg + \frac{h_g}{l} \{F_{\text{all}} - \text{sgn}(V)F_{\text{DR}}(V)\} \right] \dots\dots\dots (8)$$

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。

前後輪駆動力配分比  $k$  を導入して、総制駆動力  $F_{\text{all}}$  を以下のように配分することを考える。

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

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

ここで、 $0 \leq k \leq 1$  であり、 $k=0$  は前輪駆動、 $k=1$  は後輪駆動を表す。

〈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  $P_{\text{in}}$  は (11) 式で表される<sup>(9)</sup>。

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_c + P_i \dots\dots\dots (11)$$

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

車輪の慣性力によるトルクは十分小さく、スリップ率  $\lambda_j$  も小さいとすると、車軸周りのトルク  $T_j$ 、車輪角速度  $\omega_j$  は以下の式で表される。

$$T_j \simeq rF_j \dots\dots\dots (12)$$

$$\omega_j \simeq \frac{V}{r} (1 + \lambda_j) \dots\dots\dots (13)$$

従って、機械出力  $P_{\text{out}}$  は (14) 式で表される。

$$P_{\text{out}} = 2 \sum_{j=f,r} \omega_j T_j \simeq V F_{\text{all}} \sum_{j=f,r} \left( 1 + \frac{\gamma_j(k) F_{\text{all}}}{2 D_s' N_j(V, F_{\text{all}})} \right) \gamma_j(k) \quad (14)$$

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。

$$P_c = 2 \sum_{j=f,r} R_j i_{qj}^2 \simeq \frac{r^2}{2} F_{\text{all}}^2 \sum_{j=f,r} \frac{R_j}{K_{tj}^2} \gamma_j^2(k) \quad (15)$$

ここで、 $R_j$  はモータの電機子巻線抵抗、 $i_{qj}$  は  $q$  軸電流、 $K_{tj}$  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  $\lambda_j$  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。

$$P_i = 2 \sum_{j=f,r} \frac{v_{odj}^2 + v_{oqj}^2}{R_{cj}} = 2 \sum_{j=f,r} \frac{\omega_{ej}^2}{R_{cj}} \{ (L_{dj} i_{odj} + \Psi_j)^2 + (L_{qj} i_{oqj})^2 \} \simeq 2 \frac{V^2}{r^2} \sum_{j=f,r} \frac{P_{nj}^2}{R_{cj}} \left\{ \left( \frac{r L_{qj} \gamma_j(k) F_{\text{all}}}{2 K_{tj}} \right)^2 + \Psi_j^2 \right\} \quad (16)$$

ここで、 $v_{odj}$ 、 $v_{oqj}$  はそれぞれ  $dq$  軸の誘起電圧、 $R_{cj}$  は等価鉄損抵抗、 $\omega_{ej}$  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、 $i_{odj}$ 、 $i_{oqj}$  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、 $\Psi_j$  は磁束鎖交数である。等価鉄損抵抗  $R_{cj}$  は (17) 式で表される。

$$\frac{1}{R_{cj}(\omega_{ej})} = \frac{1}{R_{c0j}} + \frac{1}{R_{c1j} |\omega_{ej}|} \quad (17)$$

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。

以上より、インバータ入力電力  $P_{\text{in}}$  は車体速  $V$ 、総制駆動力  $F_{\text{all}}$ 、前後輪駆動力配分比  $k$  の関数で表される。

$$P_{\text{in}}(V, F_{\text{all}}, k) = P_{\text{out}}(V, F_{\text{all}}, k) + P_c(F_{\text{all}}, k) + P_i(V, F_{\text{all}}, k) \quad (18)$$

### 3. 移動時間最短速度軌道の導出

初期条件、終端条件、エネルギー制約、速度制約、制駆動力制約を満たしつつ、移動時間  $t_t$  を最小とする速度軌道  $V(t)$  及び前後輪駆動力配分比  $k(t)$  を求める。評価関数、拘束条件は以下のように示される。

$$\min. \quad t_t = \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \quad W_{\text{in}}(t) = \int_{t_0}^{t_f} P_{\text{in}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \leq W_{\text{lim}} \quad (20)$$

$$|F_{\text{all}}(t)| \leq F_{\text{lim}} \quad (21)$$

$$V(t) \leq V_{\text{lim}} \quad (22)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) = \begin{pmatrix} \frac{1}{M}(F_{\text{all}} - \text{sgn}(V)F_{\text{DR}}(V)) \\ V(t) \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\chi(\mathbf{x}(t_0)) = \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 = \begin{pmatrix} V(t_0) - V_0 \\ X(t_0) - X_0 \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (24)$$

$$\psi(\mathbf{x}(t_f)) = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f = \begin{pmatrix} V(t_f) - V_f \\ X(t_f) - X_f \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (25)$$

ここで、 $W_{\text{lim}}$  は使用できるエネルギー、 $F_{\text{lim}}$  は最大の制駆動力、 $V_{\text{lim}}$  は制限速度である。

本稿では、勾配法を用いて最適速度軌道を導出する。また、(21)、(22) 式の拘束条件を満たすために、以下のようなペナルティ関数を被積分項に加える<sup>(10)</sup>。

$$P_1(t) = \begin{cases} \frac{r_1}{2} (F_{\text{lim}} - |F_{\text{all}}(t)|)^2 & (F_{\text{lim}} < |F_{\text{all}}(t)|) \\ 0 & (F_{\text{lim}} \geq |F_{\text{all}}(t)|) \end{cases} \quad (26)$$

$$P_2(t) = \begin{cases} \frac{r_2}{2} (V_{\text{lim}} - |V(t)|)^2 & (V_{\text{lim}} < |V(t)|) \\ 0 & (V_{\text{lim}} \geq |V(t)|) \end{cases} \quad (27)$$

ここで、 $r_1$ 、 $r_2$  はペナルティ関数の重みである。

### 4. シミュレーション

〈4・1〉 比較条件 比較条件として以下の 3 通りの速度パターンを考える。

従来法 制限速度  $V_{\text{lim}}$  まで一定加速度  $a_x$  で加速した後、一定速度で走行し、その後一定減速度  $-a_x$  で減速する速度軌道を考える。このような速度パターンは以下の式で与えられる。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 + a_x t & (t_0 < t < t_1) \\ V_{\text{lim}} & (t_1 < t < t_2) \\ V_{\text{lim}} - a_x t & (t_2 < t < t_f) \end{cases} \quad (28)$$

ここで、

$$a_x = \frac{V_{\text{lim}}(V_f + V_0) - \frac{1}{2}V_0^2 - \frac{1}{2}V_f^2 - V_{\text{lim}}^2}{X_t - V_{\text{lim}}(t_f - t_0)} \quad (29)$$

$$X_t = X_f - X_0 \quad (30)$$

$$t_1 = t_0 + \frac{V_{\text{lim}} - V_0}{a_x} \quad (31)$$

$$t_2 = t_f - \frac{V_{\text{lim}} - V_f}{a_x} \quad (32)$$

である。(28) 式で与えられる速度パターンのうち、エネルギー制約を満たしつつ、移動時間  $t_t$  が最少となる速度軌道で走行する。

提案法 1  $k = 0.5$  として、3 章で示した最適制御問題を解き、導出された速度軌道で走行する。

提案法 2 瞬間消費電力を最小とする  $k = k_{\text{opt}}$  として、3 章で示した最適制御問題を解き、導出された速度軌道で走行する。 $k_{\text{opt}}$  は  $\partial P_{\text{in}} / \partial k|_{k=k_{\text{opt}}} = 0$  を満たすので、以下の式で表される。

$$k_{\text{opt}}(V, F_{\text{all}})$$

Tab. 3 Experimental conditions.

	$V_0$	$V_f$	$X_f - X_0$	$F_{\max}$	$V_{\max}$	$W_{\lim}$
case A	0 km/h	0 km/h	800 m	2000 N	60 km/h	250 kW <sub>s</sub>
case B	0 km/h	0 km/h	800 m	2000 N	60 km/h	300 kW <sub>s</sub>

Tab. 4 Traveling time.

	Traveling time [s]		
	Conventional	Proposed 1	Proposed 2
case A	74.34	66.20	65.00
case B	59.52	57.50	56.50

$$= \frac{V}{D_s' N_f(V, F_{\text{all}})} + \frac{r^2 R_f}{K_{tj}^2} + \frac{V^2}{R_{cj}(\omega_{ej})} \left( \frac{L_{qf}}{\Psi_f} \right)^2$$

$$= \frac{V}{D_s' \sum_{j=f,r} \frac{1}{N_j(V, F_{\text{all}})}} + r^2 \sum_{j=f,r} \frac{R_j}{K_{tj}^2} + V^2 \sum_{j=f,r} \frac{1}{R_{cj}(\omega_{ej})} \left( \frac{L_{qj}}{\Psi_j} \right)^2 \quad (33)$$

〈4・2〉 シミュレーション Table 3 に示される条件で速度軌道を最適化し、シミュレーションによって提案法の有効性を検証した。シミュレーション結果を Fig. 4, 5 に示す。また、シミュレーション結果を分析するために、(34)–(38) 式のように、機械出力  $P_{\text{out}}$  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  $P_R$ 、スリップで失われる仕事  $P_S$  に分離する。

$$P_{\text{out}} = P_M + P_J + P_R + P_S \quad (34)$$

$$P_M = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} M V^2 \right) \quad (35)$$

$$P_J = 2 \sum_{j=f,r} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} J \omega_j^2 \right) \quad (36)$$

$$P_R = F_{DR} V \quad (37)$$

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

$$= (P_M + P_R) \sum_{j=f,r} \lambda_j \gamma_j(k) \quad (38)$$

また、これらの積分値を以下のように定義する。

$$W_X = \int_{t_0}^{t_f} P_X(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \quad (39)$$

ここで、 $X$  には  $M, J, R, S, c, i$  が入る。

Table 4 に各条件での移動時間を示す。従来法と比較して、case A では提案法 1 で 11.0 %、提案法 2 で 12.6 % の移動時間削減、case B では提案法 1 で 3.39 %、提案法 2 で 5.07 % の移動時間削減を達成した。

〈4・2・1〉 case A ( $W_{\lim} = 250 \text{ kW}_s$ ) Fig. 4(a) に車体速を示す。提案法 1 では、従来法と比較して最高速度は低くなるものの、低速時の加減速度を大きくすることで、移動時間の短縮を図っている。低速時の加減速度を大きくすることで、Fig. 4(b) のように高速時の駆動力を小さくすることができ、最高速度も抑えることができるので、Fig. 4(e), 4(g) のように、鉄損、走行抵抗による損失を抑圧することができる。一方で、従来法と比較して、総制駆動力  $F_{\text{all}}$  の最大値は大きくなるので、Fig. 4(f) のように低速時の銅損が大きくなる。その結果、Fig. 4(h) に示すように、消費エネルギーに占める銅

損  $W_c$  の割合が増加する。

提案法 2 では、前後輪駆動力配分比  $k$  を最適化しているの  
で、提案法 1 と比較して、モータによる損失を抑圧できる。そのため、提案法 1 よりも小さなモータ銅損  $W_c$ 、鉄損  $W_i$  で僅かに大きな駆動力を発生させることができる。 $W_c, W_i$  を削減することで、機械出力  $W_{\text{out}}$  を増加させることができるので、最高速度を上げることができる。提案法 2 では、最適駆動力配分比  $k_{\text{opt}}$  を導入することで提案法 1 と比較して  $W_c$  が 10.0 %、 $W_i$  が 2.15 % 削減され、 $W_R$  が 1.65 % 増加した。これによって、提案法 1 と比較して 1.81 % の移動時間削減を達成した。また、 $W_s$  が提案法 1 と比較して増加しているが、これは前輪の駆動力を後輪より大きくすることで、前輪のスリップ率  $\lambda_f$  が増加した影響である。

〈4・2・2〉 case B ( $W_{\lim} = 300 \text{ kW}_s$ ) Fig. 5 に case B のシミュレーション結果を示す。提案法 1, 2 共に case A と同様の傾向が見られる。case A と比較して、提案法 1, 2 共に、制限速度  $V_{\lim}$  で走行する時間が増加するので、速度軌道最適化による移動時間削減効果は小さくなる。一方で、提案法 2 では提案法 1 と比較して、1.74 % の移動時間削減を達成しており、駆動力配分比  $k$  の最適化による移動時間削減効果は case A と比較して大きな差がないといえる。

## 5. 実験

〈5・1〉 台上試験装置 台上試験には(株)小野測器が所有する Real Car Simulation Bench (RC-S)<sup>(11)</sup> 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。

〈5・2〉 制御系設計 本稿では、第 1 章で述べたように自動運転を想定しており、車体速が自動制御可能であることを想定している。モデル化誤差の影響を受けずに、車体速を指令値に追従させるために、Fig. 6 に示す車体速制御系を用いた。Fig. 6 の制御系は車体速指令値  $V^*$  を入力として、フィードフォワードと車体速フィードバックにより総制駆動力指令値  $F_{\text{all}}^*$  を生成する。総制駆動力指令値  $F_{\text{all}}^*$  は (9), (10) 式に基づいて前後輪駆動力指令値  $F_j^*$  に配分される。前後輪のトルク指令値  $T_j^*$  は前後輪のスリップ率を考慮し次式で与える。

$$T_j^* = r F_j^* + \frac{J \omega_j a_x^*}{r} (1 + \lambda_j^*) \quad (40)$$

ここで、右辺第 2 項は車輪慣性力を補償する項である。本稿では、 $\lambda_j^*$  は以下の式で与えた。

$$\lambda_j^* = \begin{cases} 0.05 & (a_x^* > 0) \\ 0 & (a_x^* = 0) \\ -0.05 & (a_x^* < 0) \end{cases} \quad (41)$$

また、センサのノイズによる影響を考慮し、 $a_x^*$  は指令値を用いた。車体加速度制御器  $C_{PI}(s)$  は PI 制御器であり、以下の式で示されるプラントに対して極配置法により極が  $-5 \text{ rad/s}$

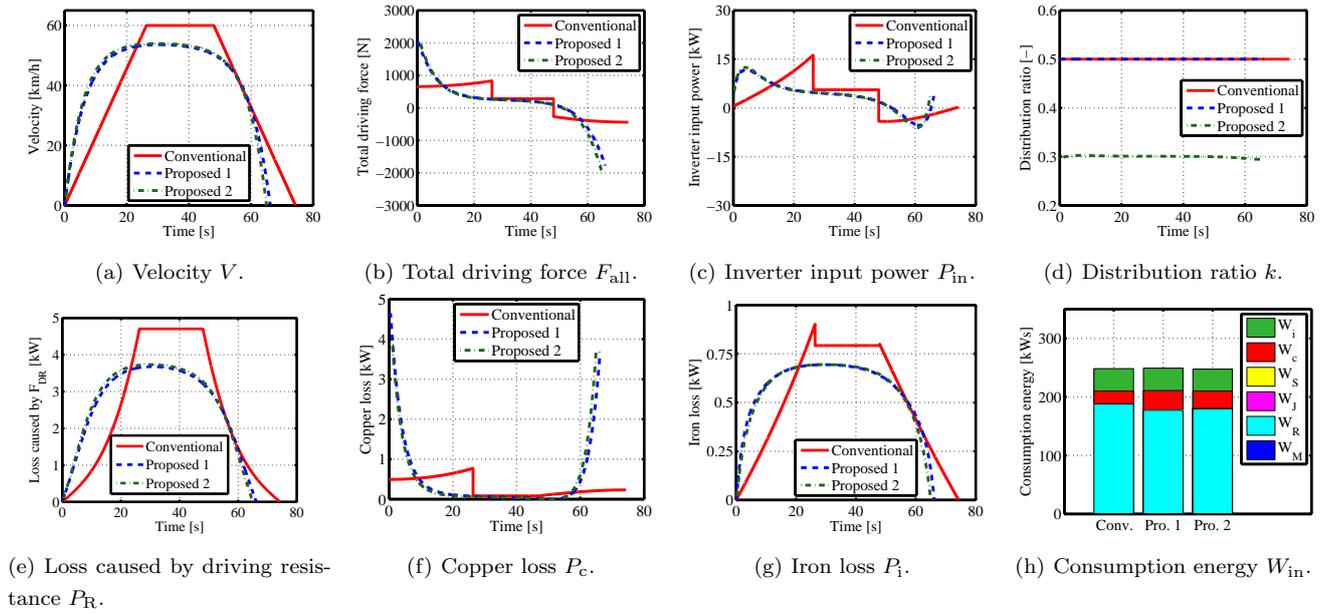


Fig. 4 Simulation results 1 (case A:  $W_{lim} = 250$  kW).

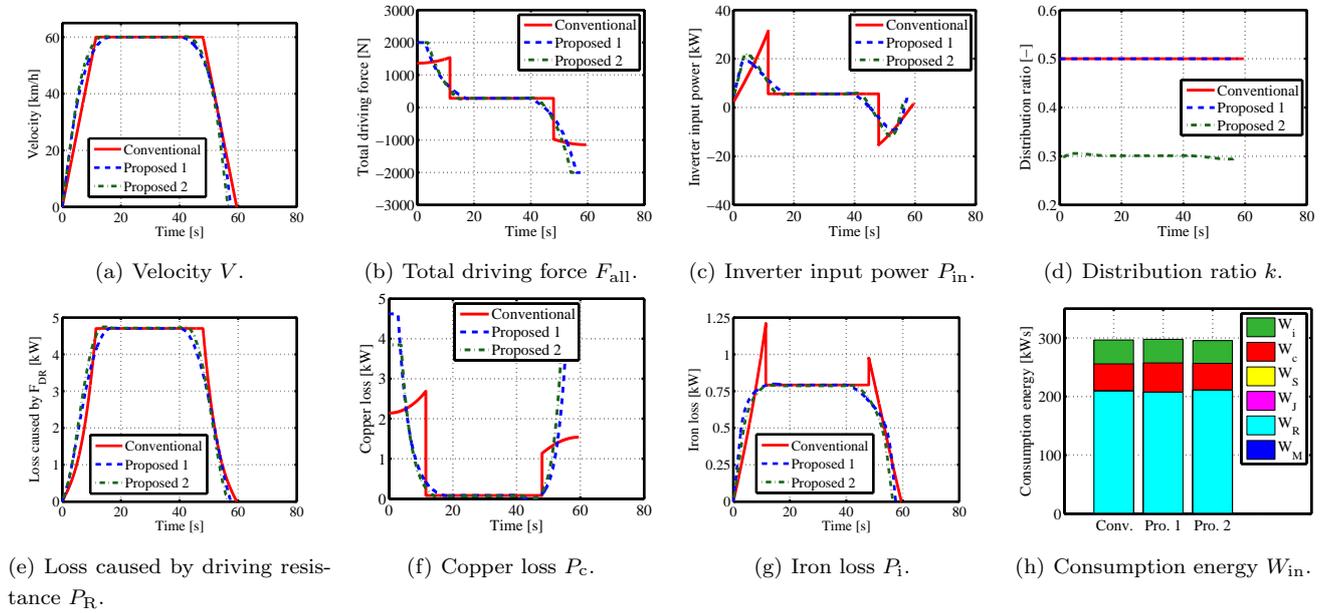


Fig. 5 Simulation results 2 (case B:  $W_{lim} = 300$  kW).

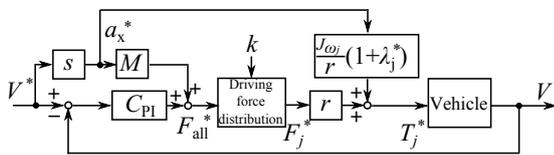


Fig. 6 Vehicle speed control system.

となるように設計した。

$$\frac{V}{F_{all}} = \frac{1}{Ms} \dots \dots \dots (42)$$

〈5・3〉 実験結果 実験結果を Fig. 7, 8 に示す。測定は、それぞれの条件に対して 6 回ずつ行った。また、インバータ入力電力  $P_{in}$  は測定値を用いて次式で求めた。

$$P_{in} = V_{dc} \sum_{j=f,r} I_{dcj} \dots \dots \dots (43)$$

ここで、 $V_{dc}$  はインバータ入力電圧、 $I_{dcj}$  は左右輪のインバータ入力電流の和である。また、車体速  $V$  としては RC-S の車体モデルから計算された速度を用いる。

Fig. 7(b), 8(b) より、加速開始直後において、大きな総制駆動力が発生しているが、この点を除けば駆動力制約を満たしていることが確認できる。また、従来法では加速度  $a_x$  がステップ状に切り替わる点において、シミュレーション結果と差異が見られるものの、これらの点を除けばシミュレーションと同様の傾向を得ることができた。前述の差異は大きなジャークによる影響である。これに伴い、大きなジャークの発生している点において、インバータ入力電力もシミュレーションと差異が見られる。また、シミュレーション同様、Fig. 7(d), 8(d)

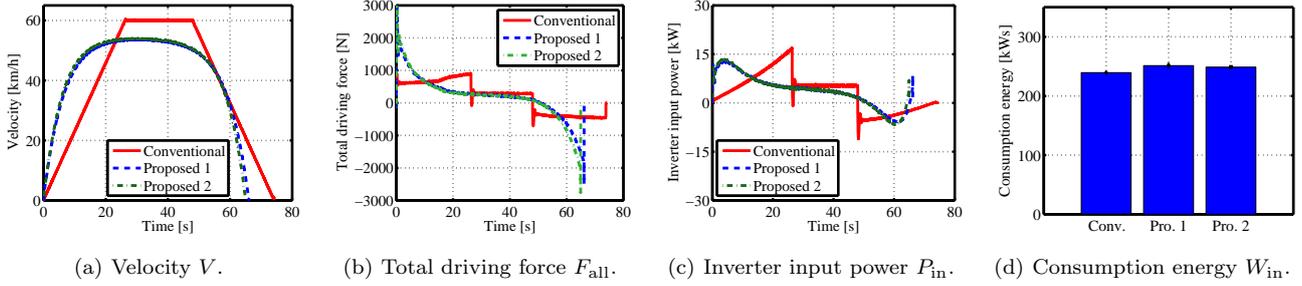


Fig. 7 Experimental results 1 (case A:  $W_{lim} = 250$  kW).

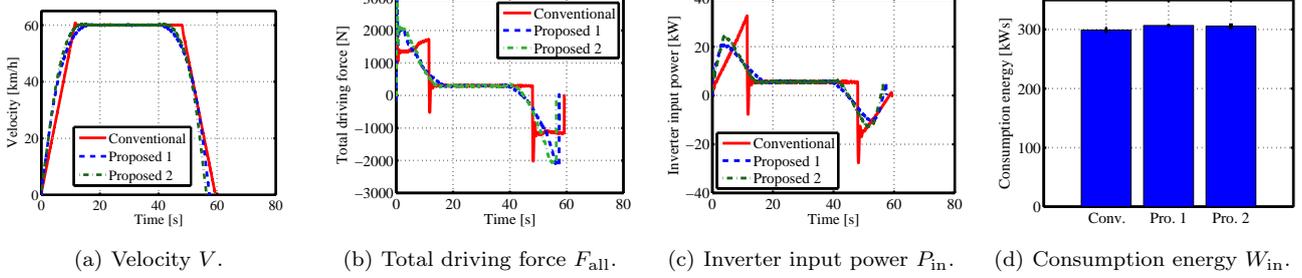


Fig. 8 Experimental results 2 (case B:  $W_{lim} = 300$  kW).

より、全ての速度軌道生成法においてエネルギー制約が満たされている。従来法と比較して、case A では提案法 1 で 11.0 %、提案法 2 で 12.6 % の移動時間削減、case B では提案法 1 で 3.39 %、提案法 2 で 5.07 % の移動時間削減を達成した。

## 6. 結論

本稿では、速度軌道および前後輪駆動力配分最適化による時間最小自動運転 (MTAD) を提案した。提案手法では、低速時の加速度を大きくし、最高速度を低くすることで、エネルギー制約を満たしつつ、移動時間を削減することが可能である。シミュレーションおよび、台上試験により提案法の有効性を確認した。本稿では直進走行のみを考慮したが、今後の改題として、直進と旋回を含むコースの走行への拡張が挙げられる。

## 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 及び 26249061) によって行われたことを付記する。

## 参考文献

- (1) 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).
- (2) M. Takeda, N. Motoi, G. Guidi, Y. Tsuruta, and A. Kawamura: "Driving Range Extension by Series Chopper Power Train of EV with Optimized dc Voltage Profile," *Proceedings of the 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2918–2923 (2012).
- (3) 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).
- (4) J. W. Kwon and D. Ghwa: "Adaptive Bidirectional Platoon Control Using a Coupled Sliding Mode Control

Method," *IEEE Trans. on Intelligent Transport Systems*, Vol. 15, No. 5, pp. 2040–2048 (2014).

- (5) 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).
- (6) Y. Ikezawa, H. Fujimoto, and Y. Hori: "Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles Based on Optimal Vehicle Velocity Trajectory Generation and Front-Rear Driving-Braking Force Distribution with Time Constraint," *The 1st IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control*, pp. 1–6 (2015).
- (7) H. Yoshida and H. Fujimoto: "Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles Based on an Optimal Vehicle Velocity Trajectory Considering Road Gradient Information," *The 1st IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control*, pp. 1–6 (2015).
- (8) 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).
- (9) S. Harada and H. Fujimoto: "Range Extension Control System Based on Optimization of Acceleration-Deceleration Trajectory and Front and Rear Driving-Braking Force Distribution," *Multi-symposium on Control Systems 2014*, 6F1–4 (2014) (in Japanese).
- (10) T. Ohtsuka: "Introduction to Nonlinear Optimal Control," CORONA PUBLISHING CO.,LTD. (2011) (in Japanese).
- (11) D. Kawano, Y. Goto, K. Echigo, and K. Sato: "Analysis of Behavior of Fuel Consumption and Exhaust Emissions under On-road Driving Conditions Using Real Car Simulation Bench(RC-S)," *2009 JSAE Annual Congress (Spring)*, Vol. 19, pp. 9–12 (2009) (in Japanese).