

# 電気自動車における信号情報を考慮した 速度軌道最適化による航続距離延長自動運転

吉田 英樹\*, 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)

Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicles  
Based on Optimal Velocity Trajectory Considering Signal Information  
Hideki Yoshida\*, 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

Electric Vehicles (EVs) are deemed as an appealing and practical solution for environmental and energy problems. The mileage per charge of EVs, however, is shorter than the mileage of Internal Combustion Engine Vehicles (ICEVs). In this paper, Range Extension Autonomous Driving (READ) system considering traffic signal information is proposed. The proposed system optimizes the velocity trajectory for autonomous driving. The authors carried out simulations and experiments that proved the effectiveness of the proposal in terms of mileage per charge.

キーワード：電気自動車, 航続距離延長自動運転, 信号情報, 非線形最適化  
(electric vehicle, range extension autonomous driving, traffic signal information, nonlinear optimization )

## 1. はじめに

地球環境問題やエネルギー問題の解決策として、環境負荷の少ない電気自動車 (Electric Vehicles: EVs) が注目されている。EVs は内燃機関搭載車 (Internal Combustion Engine Vehicles: ICEVs) と比較し、モータの応答性が速く、モーションコントロールにおいて優位性を持つ<sup>(1)</sup>。

しかし、EVs は ICEVs より一充電航続距離が短く、この課題を解決するため文献(2)では、埋込磁石同期モータの磁束を制御することで、高速領域における鉄損を削減しモータの動作効率を向上させている。また、モータの分散配置および独立駆動制御が可能であることを活かし、前後輪の駆動力配分を制御し瞬間の消費エネルギーを最小化する制御法が提案されている<sup>(3)~(6)</sup>。しかしながら、これらの先行研究では、人が車両を運転することを想定していた。

近年、高度道路交通システム (Intelligent Transport Systems: ITS) の進展とともにインフラと車両との間で道路状況に関する高速・大容量の双方向通信が可能となりつつある。そのため、近い将来自動車は車両の挙動を決定する自動運転が実現すると考えられる。走行区間での自動車の総エネルギー消費量を最小化するにあたり、道路状況を考慮した最適速度軌道設計が提案されている<sup>(7)~(8)</sup>。

文献(7)では、EV が信号情報を事前に光ビーコン等で取得できる場合を想定し、走行区間での銅損、風損による散逸エネルギーが最小になるような速度軌道を導出している。速度軌道は、一定加速度、一定速度でのみ構成されており、計算時間が大幅に短縮されている。しかし、交通信号のモデルが周期的に変動することを想定しており、一般的な道路では適用で



図 1: FPEV2-Kanon.

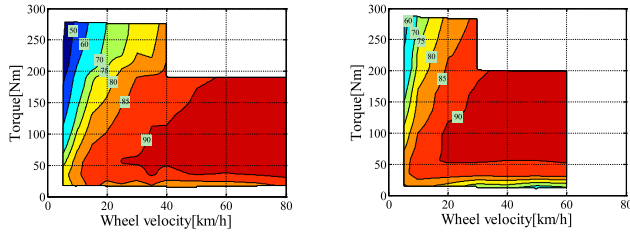
きない。文献(8)では複数の信号機を数値的なデータとして取り扱うことで、上記の問題点を解決している。しかしながら、これらの研究では鉄損といったモータ損失を詳細に解析されていない。

著者らの研究グループでは自動運転を想定し、航続距離延長自動運転 (Range Extension Autonomous Driving: READ) を提案してきた<sup>(9)~(10)</sup>。READ は、EVs が回生可能であることを生かし、速度軌道を最適化することで走行区間の総エネルギー消費量を最小化することが可能である。著者らは、文献(10)において道路勾配を全地球測位網 (Global Positioning System: GPS) により事前に取得が可能であるという仮定のもと、勾配情報を考慮することで総エネルギー消費量をより削減できることを示した。しかし、従来の先 READ では信号情報に関して考慮されていない。そこで、EV が交通信号の情報を光ビーコンや Wi-Fi 等を利用し事前に取得できるものとし、信号情報を考慮した場合の READ の基礎検討を行う。提案法の有効性をシミュレーションおよび実験で示す。

## 2. 実験車両および車両モデル

### 〈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) Front motor. (b) Rear motor.

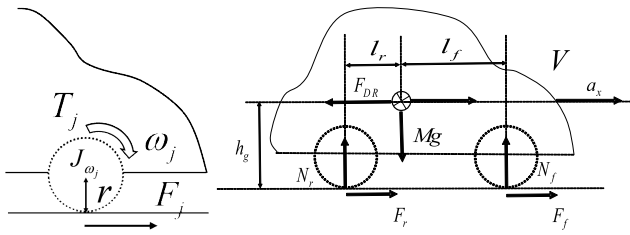
図 2: Efficiency maps of front and rear motors.

表 1: Vehicle specification.

Vehicle mass $M$	854 kg
Wheel base $l$	1.72 m
Distance from CG to front and rear axle $l_f, l_r$	$l_f : 1.01$ m $l_r : 0.702$ m
Front wheel inertia $J_{\omega_f}$	1.24 kgm <sup>2</sup>
Rear wheel inertia $J_{\omega_r}$	1.26 kgm <sup>2</sup>
Wheel radius $r$	0.302 m

表 2: Specifications of in-wheel motors.

	Front	Rear
Manufacturer	TOYO DENKI SEIZO K.K.	
Type	Direct drive system Outer rotor type	
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



(a) Rotational motion of a wheel. (b) Load transfer model.

図 3: Vehicle model.

“FPEV2-Kanon”を用いる。図 1 に車両の概観、表 1 に実験車両の車両緒元を示す。この車両は 4 輪全てに表 2 に示す東洋電機製造製ダイレクトドライブ方式の OUTER-ROTOR 型インホイールモータを搭載しており、図 2 に示すように前後輪モータの効率特性が異なる。

〈2・2〉 車両モデル 本章では、4 輪独立駆動が可能な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 3(a) より、(1) 式で表わされる。車両の運動方程式は図 3(b) よ

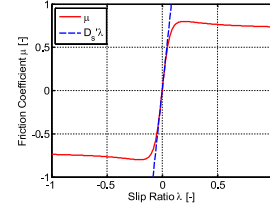


図 4:  $\mu$ - $\lambda$  curve.

り (2)–(4) 式で表わされる。

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

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

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

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

ここで、 $J_{\omega_j}$  は車輪回転部慣性モーメント、 $\omega_j$  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、 $F_{\text{all}}$  は総制駆動力、 $F_{\text{DR}}$  は走行抵抗、 $\mu_0$  は転がり摩擦係数、 $\theta$  は勾配、 $b$  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。添え字  $j$  は前後輪を表す  $f, r$  が用いられる。スリップ率  $\lambda_j$  を (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、車輪速は  $V_{\omega_j} = r\omega_j$ 、 $\epsilon$  は零割防止の微小定数である。図 4 のように  $\lambda_j$  が十分小さい場合摩擦係数  $\mu_j$  はほぼ  $\lambda_j$  に比例する<sup>(11)</sup>。この比例係数をドライビングスティフネス  $D_s'$  と定義する。直進走行時の駆動力は  $F_j$  は (6) 式で表せる。

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

また、路面に対し加速度  $\dot{V}$ 、車体速  $V$  であるとき、垂直抗力  $N_j$  は (7)、(8) 式で表される。

$$N_f(\dot{V}) = \frac{1}{2} \left[ \frac{l_r}{l} Mg - \frac{h_g}{l} M\dot{V} \right] \dots\dots\dots (7)$$

$$N_r(\dot{V}) = \frac{1}{2} \left[ \frac{l_f}{l} Mg + \frac{h_g}{l} M\dot{V} \right] \dots\dots\dots (8)$$

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。本稿では、速度軌道の変動について考察するため、前後輪の駆動力は等しい場合を取り扱う。

$$F_f = F_r = \frac{1}{4} F_{\text{all}} \dots\dots\dots (9)$$

〈2・3〉 パワーフローモデル<sup>(6)</sup> 車両のパワーフローモデルにおけるインバータ入力電力をモデル化する。スリップ率による損失、走行抵抗による損失およびモータの損失を考慮したインバータ入力電力  $P_{\text{in}}$  は次式で表わされる。

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_c + P_i \dots\dots\dots (10)$$

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。車輪の慣性力に起因

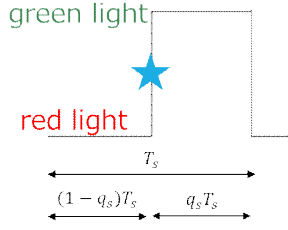


図 5: Signal information.

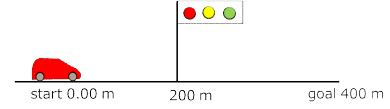


図 6: Assumed road.

するトルクが十分小さいとして無視すれば,  $T_j$ ,  $\omega_j$  は (11), (12) 式で近似できる。

$$T_j \simeq rF_j \dots\dots\dots T_j \quad (11)$$

$$\omega_j = \frac{V}{r(1 - \lambda_j)} \approx \frac{V}{r}(1 + \lambda_j) \dots\dots\dots (12)$$

(6) 式より (13) 式が得られる。

$$\lambda_j = \frac{F_j}{D_s' N_j(\dot{V})} = \frac{F_{\text{all}}/4}{D_s' N_j(\dot{V})} \dots\dots\dots (13)$$

$P_{\text{out}}$ ,  $P_c$  および  $P_i$  の近似式は次式で表わされる。

$$P_{\text{out}} = 2 \sum_{j=f,r} \omega_j T_j \simeq V \frac{F_{\text{all}}}{2} \sum_{j=f,r} \left( 1 + \frac{F_{\text{all}}/4}{D_s' N_j(\dot{V})} \right) \dots\dots\dots (14)$$

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

$$P_i = 2 \frac{V^2}{r^2} \sum_{j=f,r} \frac{P_{nj}^2}{R_{cj}} \left[ \left( \frac{r L_{qj} F_{\text{all}}/4}{K_{tj}} \right)^2 + \Psi_j^2 \right] \dots\dots\dots (16)$$

ここで,  $R_j$  はモータの電機子巻線抵抗,  $K_{tj}$  はモータのトルク定数,  $P_{nj}$  は極対数,  $L_{qj}$  は q 軸インダクタンス,  $\Psi_j$  は永久磁石による鎖交磁束である。また, 等価鉄損抵抗  $R_{cj}$  および電気角速度  $\omega_{ej}$  を次式で定義する。

$$\omega_{ej} = \frac{P_{nj} V}{r} \dots\dots\dots (17)$$

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

ここで, (18) 式の右辺第一項と第二項はそれぞれ渦電流損失とヒステリシス損失である。

以上より, インバータ入力電力  $P_{\text{in}}$  は, 変数  $V$ ,  $F_{\text{all}}$  の関数として表される。

$$P_{\text{in}}(V, F_{\text{all}}) = P_{\text{out}}(V, F_{\text{all}}) + P_c(F_{\text{all}}) + P_i(V, F_{\text{all}}) \dots\dots\dots (19)$$

〈2・4〉 信号情報のモデル 次式より信号情報をモデル化する。

$$s(t, X_1) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t \leq (1 - q_s)T_s) \\ 0 & ((1 - q_s)T_s < t \leq T_s) \end{cases} \dots\dots\dots (20)$$

$s(t, X_1)$  は  $X_1 = 200$  m に設置されている信号機の信号情報である。青信号の時は 1, 赤信号の時は 0 を出力する関数であ

る。 $T_s$  はサイクルであり, 信号灯が青から赤と一巡する時間である。 $q_s$  はスプリットであり, 1 サイクルの時間のうち, 各現示に割り当てられる時間配分を示す。本稿では,  $T_s$  は 80.0 s,  $q_s$  は 0.4 で固定させた場合の最適速度軌道を導出する。

### 3. 事前に信号情報を取得した最適速度軌道設計

〈3・1〉 評価関数および拘束条件 道路の信号情報を光ビーコンにより事前に取得し, 自動運転で走行することを想定する。初期時刻  $t_0$  から終端時刻  $t_f$  までの総エネルギー消費量を最小化するため速度軌道を最適化する。このとき, 評価関数および拘束条件は以下の式となる。

$$\min. W_{\text{in}} = \int_{t_0}^{t_f} P_{\text{in}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \dots\dots\dots (21)$$

$$s.t. \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \dots\dots\dots (22)$$

$$\chi(\mathbf{x}(t_0)) = \mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}_0 = \mathbf{0} \dots\dots\dots (23)$$

$$\psi(\mathbf{x}(t_f)) = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f = \mathbf{0} \dots\dots\dots (24)$$

$$0 \leq V(t) \leq V_{\text{lim}} \dots\dots\dots (25)$$

$$F_{\text{min}} \leq F_{\text{all}}(t) \leq F_{\text{max}} \dots\dots\dots (26)$$

$$X(t_0) \leq X_1 \dots\dots\dots (27)$$

$$X_1 \leq X(t) \quad ((1 - q_s)T_s \leq t \leq T_s) \dots\dots\dots (28)$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V(t) \\ X(t) \end{bmatrix}, \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} F_{\text{all}}(t) \\ k(t) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (29)$$

ここで,  $X(t)$  は走行距離,  $\mathbf{x}_0$  は初期条件  $\mathbf{x}_f$  は終端条件である。駆動力配分比  $k = 0.5$  として速度軌道のみを最適化するため, 数値計算の探索次元は 1 次元である。オイラー・ラグランジュ方程式を満たすように最急降下法を用いて評価関数が最小となる最適解を導出する

〈3・2〉 比較条件 本稿では, 初期時刻に Start 地点で 30.0 km/h で走行していた電気自動車を図 6 のような道路を走行し, Goal 地点 400 m で目標時間  $t_f = 80.0$  s 以内に車両が停止する場合について取り扱う。信号機は 200 m 地点に設置しているものとする。

〈3・2・1〉 従来法 1 事前に信号情報を与えた最適一定加減速軌道 光ビーコンや Wi-Fi から事前にスプリット  $q_s$ , サイクル  $T_s$  および信号機の設置位置  $X_1$  の信号情報が車両に与えられていると想定する。従来法 1 の速度軌道は, 目的地までに信号が切り替わるタイミングで信号機を通過する。その後, 目標時間内に Goal 地点に到着する軌道である。

そのような軌道のうち, (30)–(36) 式の制約の下, 総エネルギー消費量が最小となるよう一定速度区間の  $V_c$  を最適化した一定加減速軌道で走行する。速度パターンは以下の式で与える。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 - a_1 t & (0 \leq t_s) \\ V_s + a_2(t - t_s) & (t_s \leq t_1) \\ V_c & (t_1 \leq t_2) \\ V_c - a_2(t - t_2) & (t_2 \leq t_3) \end{cases} \dots\dots\dots (30)$$

ここで、速度軌道のパラメータは以下のように与えられる。

$$t_s = (1 - q_s)T_s \dots\dots\dots (31)$$

$$a_1 = \frac{V_0 t_s - X_1}{t_s^2/2} \dots\dots\dots (32)$$

$$V_s = -a_1 t_s + V_0 \dots\dots\dots (33)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \frac{-2V_c^2 - V_s^2 + 2V_s V_c}{X_f - X_1 - V_c(t_f - t_s)} \dots\dots\dots (34)$$

$$t_1 = -\frac{V_s - V_c}{a_2} + t_s \dots\dots\dots (35)$$

$$t_2 = t_f - \frac{V_c}{a_2} \dots\dots\dots (36)$$

〈3・2・2〉 従来法 2 事前に信号情報を与えない最適速度軌道<sup>(6)</sup> 信号現示の信号情報を車載カメラのみで取得し、Start 地点から目標時間以内に、Goal 地点まで到着する場合を想定する。このとき、信号機が赤から青に点灯するまで、車両は信号機の設置位置  $X_1$  で停車するものとし、時間制約なしで速度軌道を総エネルギー消費量が最小になるよう最適化する。信号機が青に点灯後、目標時間内に Goal 地点までの速度軌道を総エネルギー消費量が最小になるよう最適化する。ここで、信号機の設置位置  $X_1$ 、Start 地点  $X_0$ 、Goal 地点  $X_f$  は車載カメラによって取得できるものとする。

〈3・2・3〉 提案法 事前に信号情報を与えた最適速度軌道 光ビーコンや Wi-Fi から事前にスプリット  $q_s$ 、サイクル  $T_s$  および信号機の設置位置  $X_1$  の信号情報が車両に与えられていると想定する。目的地までに目標時間以内に、事前に取得した信号情報に基づき総エネルギー消費量が最小となる最適速度軌道で走行する。

#### 4. シミュレーション

シミュレーションにてエネルギー損失を分析するため、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。

$$P_{out} = P_M + P_J + P_R + P_S \dots\dots\dots (37)$$

$$P_M = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} M V^2 \right) \dots\dots\dots (38)$$

$$P_J = 2 \sum_{j=f,r} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} J_{\omega_j} \omega_j^2 \right) \dots\dots\dots (39)$$

$$P_R = F_{DR} V \dots\dots\dots (40)$$

$$P_S = F_{all} V \sum_{j=f,r} \frac{1}{2} \lambda_j \dots\dots\dots (41)$$

また、これらの積分値を以下のように定義する。

$$W_X = \int_{t_0}^{t_f} P_X dt \dots\dots\dots (42)$$

ここで、添え字 X には M, J, R, S, c, i が挿入される。

〈4・1〉 シミュレーション条件 シミュレーション条件を表 3 および表 4 に示す。初期時刻  $t_0=0.00$  s、初期速度  $V_0=30.0$  km/h、初期位置  $X_0=0.00$  m、終端時刻  $t_f=80.0$  s、終端速度  $V_0=0.00$  km/h、終端位置  $X_f=400$  m とした。

表 3: Iron loss specification.

$R_{c0j}$	300 $\Omega$
$R'_{c1f}$	0.130 $\Omega$ s/rad
$R'_{c1r}$	0.0525 $\Omega$ s/rad

表 4: Driving resistance condition.

Rolling friction coefficients $\mu_0$	$1.28 \times 10^{-2}$
Constant drag $C_d$	0.806
Frontal projected area $A$	1.20 $m^2$
Driving Stiffness $D_s'$ (dry asphalt)	12.0

表 5: Energy Consumption[kWs](Simulation result).

Conventional 1	Conventional 2	Proposed
53.1	61.6	44.3

〈4・2〉 シミュレーション結果 時間制約  $t_f=80.0$  s に関しシミュレーションを行った。スプリット  $q_s = 0.4$  のときのシミュレーション結果を図 7 に示す。走行距離、速度軌道、総駆動力、総エネルギー消費量、エネルギー損失、鉄損、銅損、走行抵抗損失を図 7(a)–図 7(i) および表 5 に示す。図 7(a) の星印は信号機が赤から青信号に切り替わるタイミングを示す。

従来法 1 の速度軌道は、一定減速し信号機で停車している。信号機が切り替わるタイミングで 30.0 km/h まで加速し、Goal 地点まで減速している。

従来法 2 の速度軌道は、信号機が赤を点灯しているとき、速度軌道は信号機の設置位置  $X_1$  で停車するため 30.0 km/h から最適加減速軌道で減速をしている。このとき、従来法 2 は信号情報を事前に取得していないため運動エネルギーが走行抵抗により損失しないよう大きく回生ブレーキを行っている。一方で、信号機が赤から青に点灯したとき、低速から 40.0 km/h 付近まで加速し Goal 地点で停車している。

提案手法では Start 地点から大きく減速し運動エネルギーを回生し電力として貯蓄することで、図 7(i) からわかるように従来法 1 より走行抵抗による損失を抑制している。信号機が切り替わるタイミングでは低速から 30.0 km/h まで最適加減速軌道で走行し Goal 地点で停車している。図 7(h) に示すように、信号機の設置位置を運動エネルギーを保持した状態で通過するため、従来法 1,2 より銅損を大きく抑制している。

図 7(e) の全走行区間における総エネルギー消費量において従来法 1, 2 提案手法は 53.1 kW, 61.6 kW, 44.3 kW であり、提案手法は従来法 1, 2 と比較すると 16.6 %, 28.1 % 削減している。

図 7(f) の全走行区間におけるエネルギー損失において、提案手法は従来法 1, 2 と比較すると鉄損は 0.452 %, 4.15 %, 銅損は 56.0 %, 69.7 %, 走行抵抗による損失は 2.05 %, 10.8 % 削減している。提案手法の総エネルギー損失は従来法 1, 2 と比較すると 6.31 %, 15.1 % 削減している。

#### 5. 実験結果

〈5・1〉 速度制御系 車体速度を指令値に追従させるために図 8 に示す速度制御系を用いる。図 8 に示すように前後輪トルク指令値  $T_j^*$  は駆動力指令値の項と加速度指令値  $\dot{V}^*$  を用いた車輪慣性力を補償する項で構成する。前後輪のトルク指

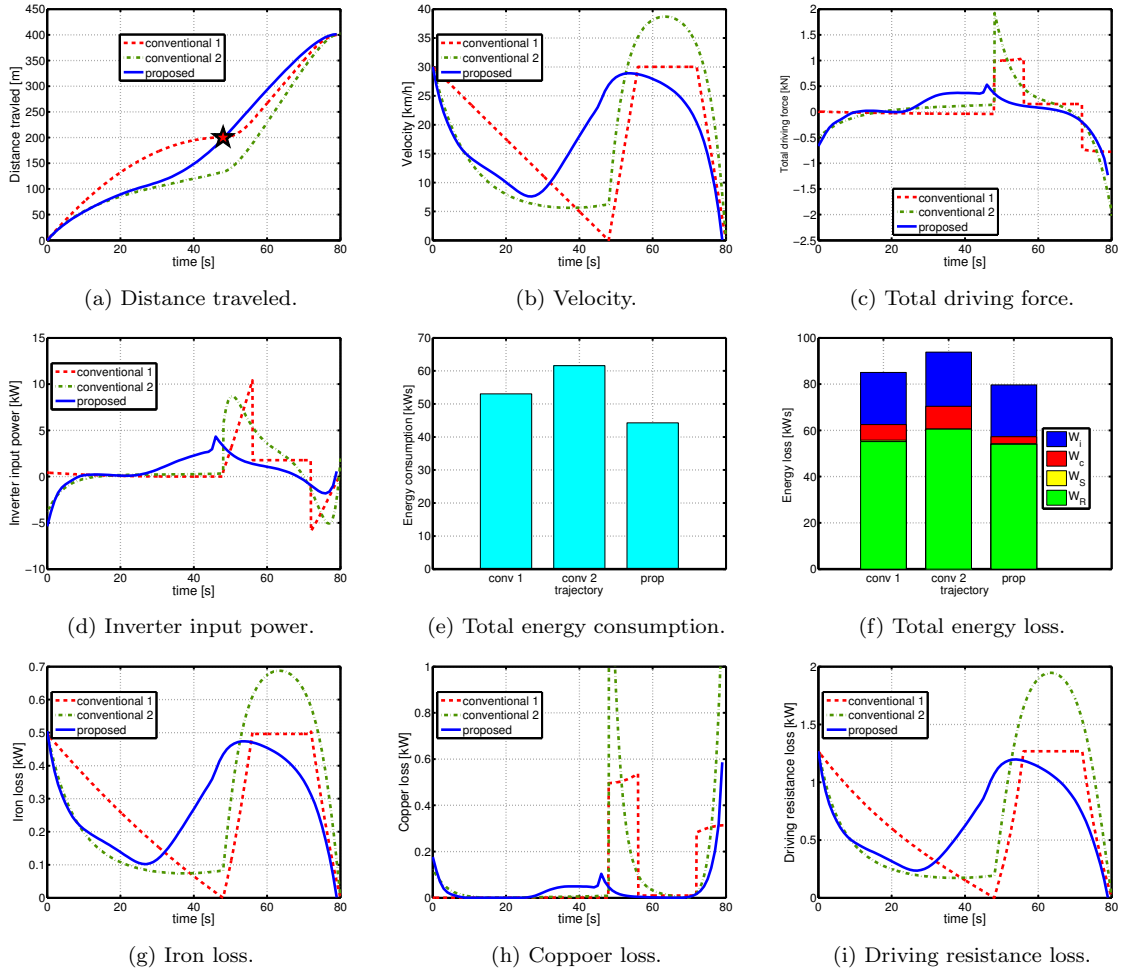


図 7: Simulation results of pattern driving.

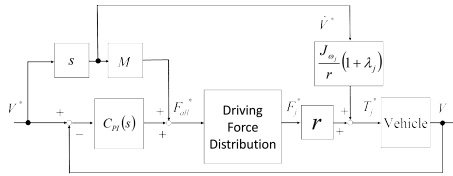


図 8: Velocity control system.

表 6: Energy Consumption[kWs](Experiment result).

Conventional 1	Conventional 2	Proposed
59.4±5.19	×	50.5±3.18

令値  $T_j^*$  は次式で表わされる。

$$T_j^* = rF_j^* + \frac{J_{\omega_j} \dot{V}^*}{r} (1 + \lambda_j^*) \dots \dots \dots (43)$$

車体速度制御器はPI制御器とし、(44)式で表されるプラントに対して極配置法により設計する。

$$\frac{V}{F_{all}} = \frac{1}{Ms} \dots \dots \dots (44)$$

運転者を模擬するため極を  $-5 \text{ rad/s}$  とした。

〈5・2〉 実験結果 各条件について4回ずつ実験を行った。

従来法2は学内試験場の速度制約で実験を行えないため本稿ではシミュレーションのみ示す。図9に実験結果を示す。インバータ入力電力  $P_{in}$  は、インバータ入力電圧  $V_{dc}$ 、左右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。

$$P_{in} = V_{dc} \sum_{j=f,r} I_{dcj} \dots \dots \dots (45)$$

車体速  $V$  は、4輪の車輪速の平均値とした。実験結果を図9に示す走行距離、速度軌道、総駆動力、インバータ入力、機械出力を図9(a)–図9(e)に示す。走行区間の消費エネルギー測定結果を図9(f)および表6に示す。

従来法1および提案法の総エネルギー消費量は、それぞれ59.4 kWs, 50.5 kWsである。提案手法の総エネルギー消費量は従来法1と比較して14.9%削減している。シミュレーション結果と同様の傾向がえられた。

### 6. 結論および今後の課題

本稿では、時間制約のもと信号情報を利用して速度軌道のみを最適化することで総エネルギー損失を従来法より削減した。今後の課題として、複数機の信号情報を考慮したREADや前方車両の変動を考慮できるようモデル予測制御によるREADを研究していく必要がある。

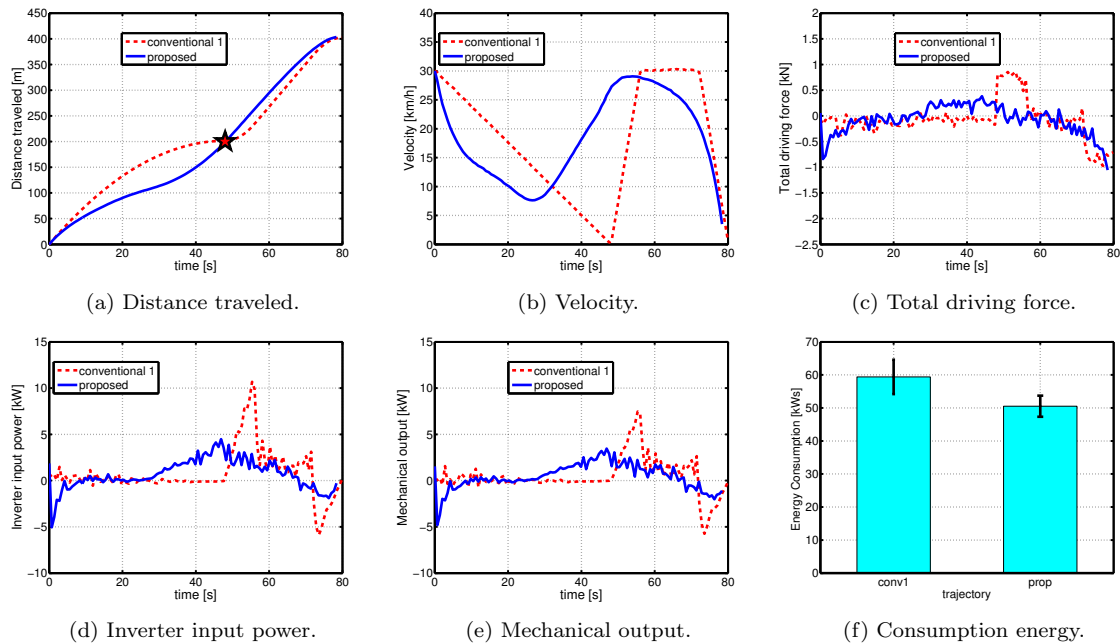


図 9: Experimental results of pattern driving.

## 謝 辞

最後に、本研究の一部は、NEDO 産業技術助成（プロジェクト ID:05A48701d）及び、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究 A 課題番号:22246057 および 26249061）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) H.Hijikata, K.Akatsu,Y.Miyama, H.Arita, and A.Daikoku :“Suppression Control Method for Iron Loss of MATRIX Motor under Flux Weakening Utilizing Individual Winding Current Control,”The 7th International Power Electronics Conference, pp. 2673–2678 (2014).
- (3) R.Nakajima, R.Koyama, D.Matsuoka, Y.Kano, and M.Abe:“The Effects of tire force distribution control on reducing tire slip energy dissipation,”2013 JSAE Annual Congress (Spring), No. 30, pp. 21–24 (2013).(inJapanese) 中島玲二, 小山亮, 水貝智洋, 松岡大輔, 狩野芳郎, 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配分制御の効果」, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 30, pp. 21–24 (2013).
- (4) T.Kobayashi, E.Katsuyama, H.Sugiura, E.Ono, and M.Yamamoto:“Study on Driving Force Distribution and Power Consumption in Cornering : Formulation for Steady State Cornering and Validation Using EV,”JSAE Transaction, Vol. 45, No. 2, pp. 309–314 (2014).(inJapanese) 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-」, 自動車技術会論文集, Vol. 45, No. 2, pp. 309–314 (2014).
- (5) O.Nishihara, T.Kumazawa:“ElectricPower Conservationby Driving/Braking Force Distribution in Electric Vehicle,”Dynamics and Design Conference, pp. 330–1–300–6 (2010).(inJapanese) 西原修, 熊澤卓真 : 「制駆動力配分による電気自動車の低消費電力化」, 日本機械学会, Dynamics and Design Conference, pp. 330–1–300–6 (2010).
- (6) 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).
- (7) G.Nunzio, C.Wit, P.Moulin, and D.Domenico:“Eco-Driving in Urban Traffic Networks using Traffic Signal Information,”52nd IEEE Conference on Decision and Control, pp.892–898 (2013).
- (8) X.Wu, X.He, G.Yu, A.Harmandayan, and Y.Wang:“Energy-Optimal Speed Control for Electric Vehicles on Signalized Arterials,”IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, pp.1–11 (2015).
- (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, 6F1–4 (2014) (in Japanese). 原田慎吾・藤本博志 : 「電気自動車における損失を考慮した加減速軌道および前後輪制駆動力配分最適化による航続距離延長制御」, 制御部門マルチシンポジウム, 6F1-4, 8 pages (2014).
- (10) 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).
- (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).