

3101 前後輪横力制御と制駆動力配分に基づく電気自動車の 先進安全航続距離延長制御システムの提案

Proposal of Advanced Safety Range Extension Control System for Electric Vehicle Based on
Front/Rear Lateral Force Control and Driving/Braking Force distribution

○角谷 勇人 (東京大学) 藤本 博志 (東京大学)

Hayato Sumiya, Hiroshi Fujimoto,
The University of Tokyo, Kashiwanoha, 5-1-5, Kashiwa, Chiba

Mileage per charge is the critical issue for electric vehicle. In order to solve this problem, we have proposed the range extension control system(RECS). Although it is effective for mileage per charge, there is the potential which makes the vehicle stability decreases, because driving force difference between left and right motor is generated. In this paper, we propose advanced safety range extension control system (ASRECS). This proposed method improves not only mileage per charge but also vehicle stability on the curving road. The effectiveness of proposed method is verified by experimental results.

Key Words: electric vehicle, front and rear active steering, mileage per charge, range extension control system

1 序 論

地球温暖化など環境問題に伴い、電気自動車(Electric Vehicle: EV)が注目を集めている。EVは環境性能に非常に優れているだけでなく、駆動源がモータであるため4つの優位点を持つ^[1]。その4つとは、小型高出力のため分散配置が可能、力行だけでなく回生も可能、電流値の測定により正確なトルク検出が可能、トルク応答が内燃機関と比較し2桁速いということである。これらの優位点は車両姿勢制御に対し非常に有効である^{[2][3][4]}。

これまで述べてきたように、環境性能だけでなく制御面でも優位点があるEVだが今後の普及に対し課題もある。特に重要な課題は一充電走行距離である。EVはモータを駆動源とするため一充電走行距離はバッテリー容量に依存する。そこで、一充電走行距離延長のためにモータの効率改善や、複数の減速ギヤを介しモータの効率の良いところで駆動する研究が進められている^{[5][6]}。しかしながら一充電走行距離の抜本的解決にはバッテリー容量の向上が必要不可欠である。

著者らの研究グループは一充電走行距離の問題に対し航続距離延長制御システム(Range Extension Control System: RECS)を提案した^{[7][8]}。このシステムは、一充電走行距離の問題を制御の観点から取り組んでおり、複数のモータを搭載した自動車を想定していればハードウェアの改良は必要なくソフトウェアの改良のみで実装可能である。文献[8]では、制駆動力差モーメントを使用した旋回方法を提案している。自動車が旋回する時、前輪舵角を用いることにより旋回半径に応じて発生する遠心力に対する横力をタイヤに発生させる。しかしながらこの横力は旋回時は減速する方向へ力を発生させる。この力をコーナリング抵抗と呼ぶ。このコーナリング抵抗により車両が減速してしまい、走行時に減速を補うエネルギーがさらに必要となる。そこで、制駆動力モーメントを適切に使用することにより、旋回時に必要となる遠心力に対する横力を維持しながらコーナリング抵抗の最小化を行う。コーナリング抵抗が減少するため旋回時に必要となるエネルギーが減少し、一充電走行距離の延長が可能となる。

しかしながら、上記旋回方法では制駆動力差モーメントを積極的に使用するため車両横滑り角が負の方向へ大きくなる。また制駆動力差モーメントを使用するため一輪当たりのタイヤから発生する力が大きくなってしまい、車両安定性の観点から不利となってしまう。そこで本稿では、先進安全航続距離延長制御システム(Advanced Safety Range Extension Control System: ASRECS)を提案する。この提案法は、これまで提案してきたRECSに対し、文献[3]で提案されているタイヤ負荷率均等化手法を取り入れたものである。評価関数をRECSと負荷率均等



Fig.1 実験車両

化の和で定義し、それぞれを積み付けることにより通常時はRECSを、車両安定性が損なわれるときには負荷率均等化を行うことが可能となる。本提案法の有効性を実験結果より示す。尚、本稿ではモータ出力から並進速度及びヨーレートまでの最適化を行うが、文献[8]のRECSではバッテリー出力からのヨーレートまでの最適化も行っており電気出力の低減も確認している。

2 実験車両

本章では、実験車両に関して述べる。実験車両は著者らの研究グループでオリジナルに制作したFPEV2-Kanonを用いた。この実験車両は、4輪に東洋電機製造製アウトロータ型インホイールモータ(In-Wheel Motor: IWM)を装着している。そのため、各輪独立駆動が可能であり制駆動力差モーメントを用いることが可能である。また、操舵用モータとしてMaxon社製250W DCモータを搭載している。そのため、前後輪アクティブ操舵を行うことが可能である。4輪全輪にタイヤ横力センサとして日本精工株式会で開発中のマルチセンシングハブユニット軸受(MSHub)を搭載している。車両外観図を図1に示す。

3 自動車のモデル化

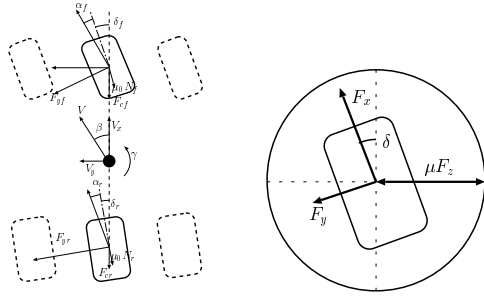
本章では、自動車の運動方程式を示す^[9]。車両モデルを図2(a)に示す。まず前後方向の運動方程式を示す。

$$F_{x0} = M\dot{V} = F_{dFL} + F_{dFR} + F_{dRL} + F_{dRR} - F_r \quad (1)$$

ここで、 F_{x0} は総駆動力、 M は車重、 V は車体速、 F_{dFL} 、 F_{dFR} 、 F_{dRL} 、 F_{dRR} は左右の駆動力である。また、 F_r は走行抵抗であり後述する。左右のタイヤ特性が等しいと考えると、それぞれの前後輪、左右の横力は $F_{yfl} \simeq F_{yfr} = F_{yf}$ 、 $F_{yrl} \simeq F_{yrr} = F_{yr}$ とみなすことが可能である。そのため自動車の運動は簡易的な二輪車両モデルで検討を行うことが可能である。車両の横方向及び重心軸周りの運動方程式は次式となる。

$$F_{y0} = MV(\dot{\beta} + \gamma) = 2F_{yf} + 2F_{yr} \quad (2)$$

4 制御系設計



(a) 二輪車両モデル (b) 摩擦円
Fig.2 自動車モデル

$$M_{z0} = I\dot{\gamma} = 2l_f F_{yf} - 2l_r F_{yr} + \frac{d_f}{2} (-F_{dFL} + F_{dFR}) + \frac{d_r}{2} (-F_{dRL} + F_{dRR}) \quad (3)$$

ここで、 F_{y0} は車両総横力、 β は車両重心点における横滑り角、 γ は車両重心軸周りのヨーレート、 M_{z0} は総ヨーモーメント、 I は車両重心軸周りのイナーシャ、 l_f 、 l_r は前後重心間距離、 d_f 、 d_r は前後輪のドレッド幅である。

各輪の横力は、車輪の横滑り角 α_f 、 α_r に応じて発生する。車輪の横滑り角とは、タイヤの向きと進行方向の間の角度のことであり、この角度が小さい時は横力は車輪の横滑り角に比例して発生する。

$$\alpha_f = \beta + \frac{l_f \gamma}{V} - \delta_f, \quad \alpha_r = \beta - \frac{l_r \gamma}{V} - \delta_r \quad (4)$$

$$F_{yf} \simeq \frac{-C_f}{\tau_s + 1} \alpha_f, \quad F_{yr} \simeq \frac{-C_r}{\tau_s + 1} \alpha_r \quad (5)$$

ここで、 δ_f 、 δ_r は前後輪の操舵角、 C_f 、 C_r は前後輪のコーナリングステイフネスである。

次に、各輪の垂直荷重 F_{zFL} 、 F_{zFR} 、 F_{zRL} 、 F_{zRR} は、前後横加速度により変化する。

$$F_{zFL} = \frac{1}{2} \frac{l_r}{l} Mg - \rho_f a_y M \frac{h_g}{d_f} - a_x M \frac{h_g}{l} \quad (6)$$

$$F_{zFR} = \frac{1}{2} \frac{l_r}{l} Mg + \rho_f a_y M \frac{h_g}{d_f} - a_x M \frac{h_g}{l} \quad (7)$$

$$F_{zRL} = \frac{1}{2} \frac{l_f}{l} Mg - \rho_r a_y M \frac{h_g}{d_r} + a_x M \frac{h_g}{l} \quad (8)$$

$$F_{zRR} = \frac{1}{2} \frac{l_f}{l} Mg + \rho_r a_y M \frac{h_g}{d_r} + a_x M \frac{h_g}{l} \quad (9)$$

ここで、 g は重力加速度、 l はホイールベース、 ρ_f 、 ρ_r はロール剛性前後配分比、 a_x 、 a_y は前後横加速度、 h_g は重心高、 d_r は後輪のドレッド幅である。

また、各車輪の制駆動力と横力、垂直荷重は図 2(b) に示すような摩擦円の関係がある。この関係はどのような場合であっても次式を満たさなければならない。

$$\sqrt{F_{dij}^2 + F_{yij}^2} \leq \mu F_{zij} \quad (10)$$

ここで、 μ は路面摩擦係数、 i, j にはそれぞれ $i = F, R, j = L, R$ が入り前後、左右を示し、各輪で成立する。

自動車は旋回時転がり摩擦抵抗や風や路面などの外乱以外に横力に伴うコーナリング抵抗が発生する。旋回時における走行抵抗 F_r を次式で定義する。

$$F_r = 2F_{yf} \sin \delta_f + 2F_{yr} \sin \delta_r + \mu_0 (F_{zFL} + F_{zFR}) \cos \delta_f + \mu_0 (F_{zRL} + F_{zRR}) \cos \delta_r + F_{dis} \quad (11)$$

ここで、 μ_0 は転がり摩擦係数、 F_{dis} は路面勾配や風などの外乱である。

4.1 評価関数

4.1.1 航続距離延長制御システム^[8] 本節では、航続距離延長制御システムの評価関数を定義し、前輪駆動電気自動車における一充電走行距離延長のため機械出力の最小化を行う。RECS の評価関数 J_{RECS} を次式で定義する。

$$J_{RECS} = T_{FL} \omega_{FL} + T_{FR} \omega_{FR} \quad (12)$$

ここで、 T_{FL} 、 T_{FR} 左右駆動輪のトルク、 ω_{FL} 、 ω_{FR} は左右駆動輪の車輪速である。

続いて各輪の駆動力と制駆動力差モーメントは次式の関係が成立する。

$$\begin{bmatrix} F_{FL} \\ F_{FR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{d_f} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{d_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x0} \\ N_{zf} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで、 N_{zf} は制駆動力差モーメントであり式 (3) の右辺第三項で表される。車両が走行中タイヤが路面に完全粘着して走行していると仮定するとトルクと駆動力及び各輪の車輪速は次式の関係が成立する。

$$\omega_{FL} = \frac{1}{r} \left(V_x - \frac{d_f}{2} \gamma \right), \quad \omega_{FR} = \frac{1}{r} \left(V_x + \frac{d_f}{2} \gamma \right) \quad (14)$$

$$T_{ij} = r F_{dij} \quad (15)$$

ここで、 V_x は車両前後方向の車体速である。式 (13) ~ 式 (15) を機械出力式 (12) に代入する。

$$J_{RECS} = F_x V_x + N_z \gamma \quad (16)$$

ここで、等速で走行すると仮定する。等速で走行する条件は、総駆動力と走行抵抗が釣り合う $F_{x0} = F_r$ のときである。走行抵抗式 (11) において、風や路面の外乱及び転がり抵抗を無視すると評価関数 J_{RECS} は次式となる。

$$J_{RECS} = (2F_{yf} \sin \delta_f + 2F_{yr} \sin \delta_r) V_x + N_z \gamma \quad (17)$$

4.1.2 負荷率均等化^[9] 本節では負荷率均等化を行う評価関数を定義する。各輪の負荷率 η を次式で定義する。

$$\eta_{FL} = \frac{\sqrt{F_{dFL}^2 + F_{yf}^2}}{\mu_{\max} F_{zFL}} \quad (18)$$

$$\eta_{FR} = \frac{\sqrt{F_{dFR}^2 + F_{yf}^2}}{\mu_{\max} F_{zFR}} \quad (19)$$

$$\eta_{RL} = \frac{\sqrt{F_{dRL}^2 + F_{yr}^2}}{\mu_{\max} F_{zRL}} \simeq \frac{|F_{yr}|}{\mu_{\max} F_{zRL}} \quad (20)$$

$$\eta_{RR} = \frac{\sqrt{F_{dRR}^2 + F_{yr}^2}}{\mu_{\max} F_{zRR}} \simeq \frac{|F_{yr}|}{\mu_{\max} F_{zRR}} \quad (21)$$

ただし、4 輪の路面摩擦係数をすべて等しいと仮定する。続いて、評価関数 J_η を定義する。評価関数 J_η は各輪の負荷率の二乗和とする。

$$J_\eta = \sum_{i=F, R} \sum_{j=L, R} (\mu_{\max} \eta_{ij})^2 \quad (22)$$

4.2 先進安全航続距離延長制御システム (提案法) 本節では、ASRECS の構成に関して述べる。最小化を行う ASRECS の評価関数 J を次式で定義する。

$$J = (1 - \nu) J_{RECS} W_{RECS} + \nu J_\eta W_\eta \quad (23)$$

ここで、 J_{RECS} は式 (17)、 J_η は式 (22)、 ν は配分を決めるパラメータ、 W_{RECS} 、 W_η は規格化を行う重み係数である。式 (23)

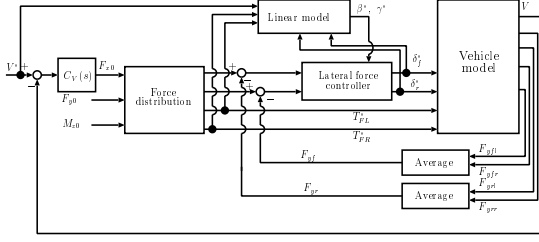


Fig.3 先進安全航続距離延長制御システムのブロック図

をラグランジュの未定乗数法を用いて最小化を行う。最小化を行うにあたり、制約条件 $g_1 \sim g_3$ を設ける。制約条件は、式 (1) ~ 式 (3) から導出され、ラグランジュ関数は次式となる。

$$L(\mathbf{x}, \lambda) = J + \lambda_1 g_1(\mathbf{x}) + \lambda_2 g_2(\mathbf{x}) + \lambda_3 g_3(\mathbf{x}) \quad (24)$$

$$\mathbf{x} = [F_{yf} \ F_{yr} \ F_{FL} \ F_{FR}]^T \quad (25)$$

$$\begin{cases} g_1(\mathbf{x}) = F_{FL} + F_{FR} - F_{x0} \\ g_2(\mathbf{x}) = 2F_{yf} + 2F_{yr} - F_{y0} \\ g_3(\mathbf{x}) = 2F_{yf}l_f - 2F_{yr}l_r + \frac{d_f}{2}(-F_{dFL} + F_{dFR}) - M_{z0} \end{cases} \quad (26)$$

ここで、 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ は定数ベクトルである。但し、最小化問題を解くにあたり β, γ, V は測定可能な物として扱い、前後輪操舵角は十分小さいとする。また前後輪操舵角 δ_f, δ_r にはそれぞれ、式 (4) を代入し、車輪の横滑り角の関数とする。その車輪の横滑り角には式 (5) の直流分を代入し、横力へ変換した。ラグランジュの未定乗数法を用いてそれぞれ解くと最適解は次式となる。

$$F_{yf} = \frac{1}{2(a_1 + a_4) + \frac{8l^2}{d_f^2}(a_7 + a_8)} \left(-a_2 + a_3 - \frac{2l}{d_f}(a_5 - a_6) - \frac{4}{d_f}(a_7 + a_8 - la_8)F_{x0} + \left(a_4 + \frac{4ll_r}{d_f^2}(a_7 + a_8) \right) F_{y0} + \frac{4l}{d_f^2}(a_7 + a_8)M_{z0} \right) \quad (27)$$

$$F_{yr} = \frac{1}{2}(F_{y0} - 2F_{yf}) \quad (28)$$

$$F_{FL} = \left(\frac{1}{2} + \frac{8l}{d_f^2} \frac{a_7 + a_8 - la_8}{2(a_1 + a_4) + \frac{8l^2}{d_f^2}(a_7 + a_8)} \right) F_{x0} + \left(-\frac{l_r}{d_f} - \frac{2l}{d_f} \frac{a_4 + \frac{4ll_r}{d_f^2}(a_7 + a_8)}{2(a_1 + a_4) + \frac{8l^2}{d_f^2}(a_7 + a_8)} \right) F_{y0} + \left(-\frac{1}{d_f} - \frac{2l}{d_f} \frac{a_4 + \frac{4l}{d_f^2}(a_7 + a_8)}{2(a_1 + a_4) + \frac{8l^2}{d_f^2}(a_7 + a_8)} \right) M_{z0} - \frac{2l}{d_f^2} \frac{-a_2 + a_3 - \frac{2l}{d_f}(a_5 - a_6)}{2(a_1 + a_4) + \frac{8l^2}{d_f^2}(a_7 + a_8)} \quad (29)$$

$$F_{FR} = F_{x0} - F_{FL} \quad (30)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{2V}{C_f}(1 - \nu)W_{RECS} + \left(\frac{1}{F_{zFL}^2} + \frac{1}{F_{zFR}^2} \right) \nu W_\eta \\ a_2 = 2V \left(\beta + \frac{l_f}{V} \gamma \right) (1 - \nu) W_{RECS} \\ a_3 = 2V \left(\beta - \frac{l_r}{V} \gamma \right) (1 - \nu) W_{RECS} \\ a_4 = \frac{2V}{C_r}(1 - \nu)W_{RECS} + \left(\frac{1}{F_{zFL}^2} + \frac{1}{F_{zFR}^2} \right) \nu W_\eta \\ a_5 = -\frac{d_f}{2} \gamma (1 - \nu) W_{RECS}, \quad a_6 = \frac{d_f}{2} \gamma (1 - \nu) W_{RECS} \\ a_7 = \frac{1}{F_{zFL}^2} \nu W_\eta, \quad a_8 = \frac{1}{F_{zFR}^2} \nu W_\eta \end{cases} \quad (31)$$

$\nu = 0.0$ の時は RECS を、 $\nu = 1.0$ の時は負荷率均等化を、そして $\nu = 0.5$ のときは 2 つの手法の協調制御を行う。ASRECS の

構成図を図 3 に示す。制御入力となる総駆動力 F_{x0} 、横力 F_{y0} 、ヨーモーメント M_{z0} より評価関数 J が最小となる \mathbf{x}^* を生成する。 \mathbf{x}^* における前後輪横力指令値は横力制御を構成し前後輪操舵角指令値を、前輪駆動力指令値は車輪の慣性項を考慮した次式に基づいて左右トルク指令値とした。

$$T^* = rF_d^* + J_\omega \dot{\omega} \quad (32)$$

5 実験

提案法の有効性を確認するために実験を行った。車両は、第 2 節に示した実験車両を用いた。実験は大学構内の旋回場で速度及びヨーレートが一定である定常円旋回を行った。総駆動力指令値 F_{x0} は一定速で有効性の比較を行うため構成した車体速制御系の出力を用いた。車体速制御系は式 (1) に示す車重を考慮したプラントに対し比例制御器を用い、極配置設計を行い設計した。車体速制御系のコントローラ $C_V(s)$ はドライバモデルに相当し、極は -2 rad/s とした。横力指令値は次式より生成した。

$$F_{y0} = \frac{MV^2}{R} \quad (33)$$

ここで、 R は定常円旋回における旋回半径である。また、ヨーモーメント指令値 M_{z0} は $M_{z0} = 0$ とした。これは、定常円旋回で行ったためヨーレートの変動が無いからである。

前後輪操舵角指令値は、横力制御を行うことにより生成した。横力制御系は横力と車輪の横滑り角の関係を一次遅れで示した式 (5) に対して比例積分制御器を用い重根極配置設計を行った。前後輪横力制御の極をそれぞれ -3 rad/s 、 -1 rad/s とした。前輪横力に関しては、第 2 節で示した横力センサを用い、後輪横力に関しては、前輪横力と横加速度を用い式 (2) から推定した。また前後輪横力制御系から生成された前後輪横滑り角指令値 α_f^* 、 α_r^* は車両線形モデルより推定したヨーレート、横滑り角及び車体速指令値を用い式 (4) より前後輪操舵角指令値へ変換した。尚、前後輪操舵角指令値生成の際に使用するコーナリングステイフネスはそれぞれ $C_f = 8000 \text{ N/rad}$ 、 $C_r = 15000 \text{ N/rad}$ 、時定数を $\tau = 0.1585 \text{ s}$ とした。

速度 $V = 15 \text{ km/h}$ 、旋回半径 $R = 6.0 \text{ m}$ で旋回を行った。通常の自動車を想定した制御がない前輪操舵角のみでの旋回、提案法において配分比 ν を $\nu = 0.0$ 、 $\nu = 0.5$ 、 $\nu = 1.0$ の 3 通りの合計 4 通りで比較を行った。尚、最適化にあたり重み係数 $W_{RECS} = 5.0 \times 10^{-3}$ 、 $W_\eta = 1.0$ とし規格化を行なっている。その結果を図 4 に示す。

図 4(a)、図 4(b)、図 4(c) にヨーレート、横滑り角、車体速を示す。ヨーレートは 4 つの手法ですべてほぼ等しいが、横滑り角は制御無しで大きく発生し、提案法の 3 つの配分では大きく減少している。これは、提案法が制駆動力差モーメントと後輪操舵を用いているためである。車体速では、制御が無い場合と比較し提案法が速くなっている。これは、前輪操舵を減少させることにより前輪操舵から発生する走行抵抗が減少したためである。図 4(d)、図 4(e)、図 4(f) に前後輪操舵角及び制駆動力差モーメントを示す。制御無しでは前輪操舵のみで旋回しているが、提案法では前後輪操舵及び制駆動力差モーメントを使用している。また、制駆動力差モーメントは ν の値を大きくすると減少していき、前輪操舵角が上昇している。これは、 ν を大きくしていくに当たり負荷率均等化の制御が行われいているためである。図 4(h) ~ 図 4(k) に各手法における負荷率の結果を示す。 $\nu = 0.0$ の際は RL が非常に大きくなり、 $\nu = 0.5$ 、 $\nu = 1.0$ においては後輪の負荷率が下がり前輪の負荷率が上がるにより均等化されていることが確認できる。図 4(g) にそれぞれの手法の機械出力を示す。尚、インバータ、モータなどの効率は 100% と仮定し機械出力の変化を式 (12) より算出し比較している。制御無しに対し、 $\nu = 0.0$

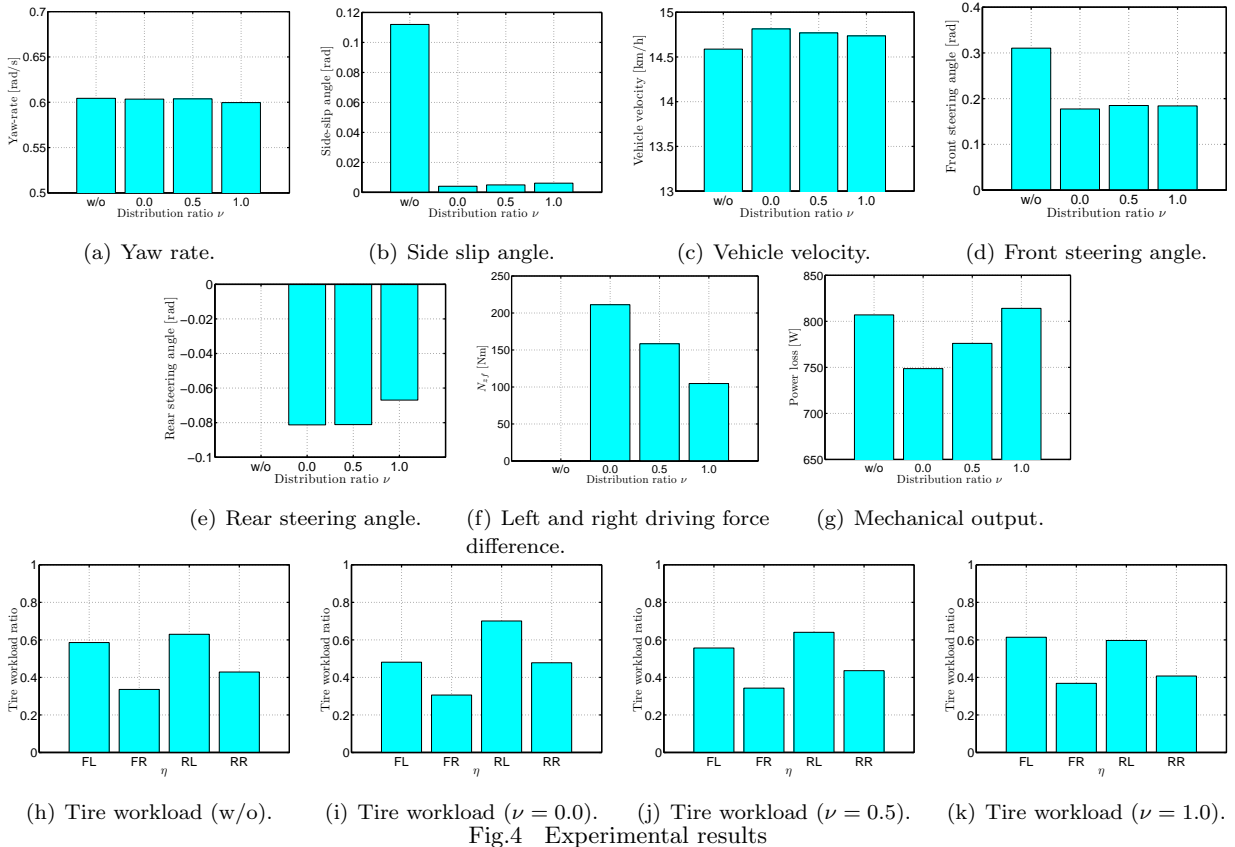


Fig.4 Experimental results

Table.1 1 kWh 当たりの走行距離 (km/kWh)

	ν			
	w/o	0.0	0.5	1.0
	18.1	19.8	19.0	18.1

の時は約 6%, $\nu = 0.5$ の際は約 3% 程度機械出力が減少している。しかし, $\nu = 1.0$ においては制御無しと比較し損失が上昇してしまっている。これは, 評価関数をすべて負荷率均等化で計算をしているためであり, 車両姿勢の安定向上に特化しているためである。

Table. 1 に kWh 当たりの走行距離を示す。尚, 各値は走行距離は速度の時間積分, エネルギーは機械出力の時間積分で求め走行距離をエネルギーで除することにより求めた。制御無しと比較し $\nu = 0.0$ の時は約 8%, $\nu = 0.5$ の時は約 5% の一充電走行距離が延長されており, $\nu = 1.0$ のときは制御無しと同様の一充電走行距離であることが確認できる。

6 結論と今後の課題

本稿では, 先進安全航続距離延長制御システムの提案を行い実験から有効性の確認を行った。評価関数を重み付けすることにより, 安全とエコの両立ができることを示した。今後の課題として, RECS を電気損失まで拡張させることや, 高速域, また異なる旋回方法での有効性の確認が挙げられる。

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 (基盤研究 A 課題番号: 22246057) によって行われたことを付記する。また, タイヤ横力センサをご提供頂きました日本精工株式会社

に対し, ここに記し深く感謝申し上げます。

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. Industrial Electronics*, vol. 51, no. 5, pp. 954-962, 2004.
- [2] H. Fujimoto, "Regenerative brake and slip angle control of electric vehicle with in-wheel motor and active front steering," in *Proc. 1st International Electric Vehicle Technology Conference*, no. 20117205, pp. 1-7, May. 2011.
- [3] N. Ando and H. Fujimoto, "Yaw-rate control for electric vehicle with active front/rear steering and driving/braking force distribution of rear wheels," *Trans. IEE of Japan*, vol. 131, no. 4, pp. 616-623, 2011. (in Japanese)
- [4] E. Katsuyama, "Decoupled 3d moment control by in-wheel motor," in *2011 JSAE Annual Congress (Spring)*, no. 3-11, pp. 1-6, 2011. (in Japanese)
- [5] K. Sakai, K. Yuki, Y. Hashiba, and N. Takahashi, "Principle and basic characteristics of the variable-magnetic-force memory motor," in *IEE of Japan Industry Applications Society Conference*, no. III, pp. 179-184, 2009. (in Japanese)
- [6] A. Sornioti, M. Boscolo, A. Turner, and C. Cavallino, "Optimisation of a 2-speed gear box for an electric vehicle," in *Proc. 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, pp. 755-760, 2010.
- [7] 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 *IEE of Japan Technical Meeting Record*, no. IIC-10-19, pp. 23-28, 2010. (in Japanese).
- [8] H. Sumiya and H. Fujimoto, "Distribution method of front/rear wheel side-slip angles and left/right motor torques for range extension control system of electric vehicle on curving road," in *Proc. 1st International Electric Vehicle Technology Conference*, no. 20117208, pp. 1-6, May. 2011.
- [9] 安部 正人, 自動車の運動と制御. 山海堂, 2003.