

181-20145169 電気自動車の車輪横滑り角零化制御による  
コーナリング抵抗モデルの実験検証\*

郡司 大輔<sup>1)</sup> 藤本 博志<sup>2)</sup>

Experimental Validation of Cornering Resistance Model using Zero Wheel-Sideslip Control for Electric Vehicle

Daisuke Gunji Hiroshi Fujimoto

Electric mileage is one of the most important technical issue of electric vehicles (EVs). Some model based electric mileage extension control methods are proposed. In order to reduce cornering resistance using model based control method, verification of a cornering resistance model is required. In this research, zero wheel-sideslip control method for EVs is proposed. The proposed method is useful to verify a cornering resistance model. Effectiveness of the proposed method is verified by experiment. A cornering resistance model is verified by experiment using the proposed method.

**KEY WORDS: (Standardized)EV and HV systems** (Free)range extension control system, cornering resistance(A3)

### 1. はじめに

電気自動車 (EV) は環境性能に優れるだけでなく、モータの持つ優れた特性を活かすことで高度な車両運動制御を実現できることから安全性の向上においても期待が高まっている。しかし、EV は内燃機関車両に比べて一充電の航続距離が短いことが課題となっている。

著者らの研究グループでは、駆動モータの制御により車両構成を変化させることなく電気自動車の航続距離を改善する制御手法 (Range Extension Control System: RECS) を提案してきた。直進走行での RECS として、前後輪で異なる効率特性を持つ駆動モータを有する EV において、駆動力の前後輪配分比をモデルベースで最適化することで消費エネルギーを低減する方法が提案されている<sup>(1)</sup>。

一方、旋回時においては左右輪の駆動力差モーメントや後輪操舵によって前輪操舵角を小さくすることでコーナリング抵抗を低減する手法が提案されている<sup>(2)(3)</sup>。また、西原ら<sup>(4)</sup>や小林ら<sup>(5)</sup>も同様の制御手法を提案している。コーナリング抵抗をモデルベースの制御手法で低減するために、コーナリング抵抗モデルの妥当性を実験検証することが求められている。

本報ではコーナリング抵抗モデルを実車において実験検証するため、左右輪独立駆動が可能な電気自動車において、前後輪の一方の車輪横滑り角を零化する制御方法を提案し、シミュレーションと実験により提案手法の有効性を示す。また、提案手法を用いて定速・定常円旋回を行ない、駆動力推定値からコーナリング抵抗を測定し、コーナリング抵抗モデルの妥当性について検証する。

### 2. コーナリング抵抗モデル

本節ではコーナリング抵抗モデルの導出について述べる。

車両運動モデルとして代表的な二輪車両モデルにおいて、車両速度  $V$  が一定で車両横滑り角  $\beta$  が小さいとき、前輪・後輪

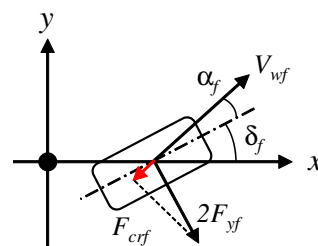


Fig. 1 Cornering resistance on front wheel.

の車輪横滑り角はそれぞれ下式で表される<sup>(6)</sup>。

$$\alpha_f \approx \beta + \frac{l_f \gamma}{V} - \delta_f \quad (1)$$

$$\alpha_r \approx \beta - \frac{l_r \gamma}{V} - \delta_r \quad (2)$$

ここで添え字  $f$  は前輪,  $r$  は後輪を表し,  $l_f, l_r$  はそれぞれ車両重心から前後輪車軸への距離,  $\gamma$  はヨーレート,  $\delta_f$  は前輪舵角,  $\delta_r$  は後輪舵角である。  $\alpha_f, \alpha_r$  が小さい線形領域においてタイヤが発生する横力は下式のように書ける。

$$F_{yf} = -2C_f \alpha_f \quad (3)$$

$$F_{yr} = -2C_r \alpha_r \quad (4)$$

ここで  $C_f, C_r$  はそれぞれ前輪, 後輪のコーナリングステイフネスである。横力のタイヤ速度方向成分がコーナリング抵抗であると考え、コーナリング抵抗  $F_{cr}$  は

$$F_{cr} = -F_{yf} \sin \alpha_f - F_{yr} \sin \alpha_r \quad (5)$$

$$= 2C_f \alpha_f \sin \alpha_f + 2C_r \alpha_r \sin \alpha_r \quad (6)$$

と書ける。  $F_{cr}$  の符号は車両に減速度を生じさせる向きを正として定義している。前輪に生じるコーナリング抵抗  $F_{crf}$  を Fig. 1 に示す。  $xy$  軸は車両固定座標であり,  $x$  軸方向が車両前方である。ここで  $\alpha_f, \alpha_r$  は小さいと仮定している、(6) 式は

$$F_{cr} \approx 2C_f \alpha_f^2 + 2C_r \alpha_r^2 \quad (7)$$

と近似できる<sup>(3)(5)</sup>。すなわち、コーナリング抵抗は前後輪それぞれの車輪横滑り角の二乗に比例する。

\*2014年5月22日自動車技術会春季学術講演会において発表。

1) 日本精工 (株) / 東京大学 (251-8501 神奈川県藤沢市鶴沼神明 1-5-50 / 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

2) 東京大学 (277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

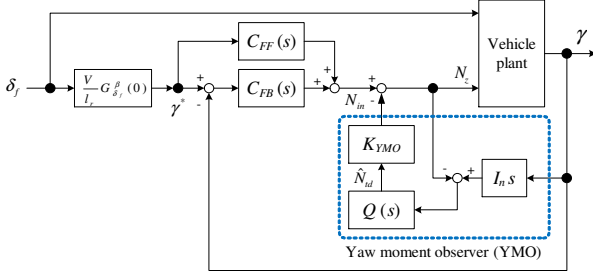


Fig. 2 Block diagram of the proposed method.

### 3. 車輪横滑り角零化制御

(7) 式で表されるコーナリング抵抗モデルを実験検証するためには、前輪・後輪いずれか一方の車輪横滑り角を零として、各々の影響を独立に検証することが望ましい。そこで本報ではヨーレート制御を用いて後輪の車輪横滑り角を零化する制御方法を提案する。車輪横滑り角を零化する制御手法には酒井ら<sup>(7)</sup>の先行研究があるが、本報ではヨーモーメントオブザーバ<sup>(8)</sup>によるヨーレート制御を用いた制御方法を提案する。

前輪のみ操舵する車両の場合、(2) 式の左辺と後輪舵角  $\delta_r$  を 0 とおくと、ヨーレート  $\gamma$  を

$$\gamma^* = \frac{V}{l_r} \beta \quad (8)$$

に制御することができれば、定常状態において後輪横滑り角  $\alpha_r = 0$  が実現される。前輪操舵に対する車両横滑り角  $\beta$  の応答の定常値は

$$\beta = \frac{1 - \frac{m}{2l} \frac{l_f}{l_r C_r} V^2}{1 + AV^2} \frac{l_r}{l} \delta_f \quad (9)$$

$$= G_{\delta_f}^{\beta}(0) \delta_f \quad (10)$$

である<sup>(6)</sup>。ここで  $m$  は車両重量、 $l = l_f + l_r$  はホイールベース、 $A$  はスタビリティファクタ

$$A = -\frac{m}{2l^2} \frac{l_f C_f - l_r C_r}{C_f C_r} \quad (11)$$

である。したがってヨーレートの目標値は前輪舵角に応じた値として

$$\gamma^* = \frac{V}{l_r} G_{\delta_f}^{\beta}(0) \delta_f \quad (12)$$

とすればよい。このとき、前輪車輪横滑り角は

$$\alpha_f = \left( \frac{l}{l_r} G_{\delta_f}^{\beta}(0) - 1 \right) \delta_f \quad (13)$$

となり車両速度が一定であれば前輪舵角に比例する。

左右輪独立駆動の電気自動車のヨーレート制御法としてヨーモーメントオブザーバ (Yaw Moment Observer: YMO) が知られている。外乱を含むヨー軸まわりの運動方程式

$$I \dot{\gamma} = 2Y_f l_f - 2Y_r l_r + N_d + N_z \quad (14)$$

において、横力ヨーモーメント  $N_t = 2Y_f l_f - 2Y_r l_r$  と外乱ヨーモーメント  $N_d$  をすべて外乱とみなして外乱オブザーバにより補償すると、外乱オブザーバのローパスフィルタのカットオフ周波数以下の帯域においてヨー軸まわりの車両運動は

$$\gamma = \frac{1}{I_n s} N_{in} \quad (15)$$

とノミナル化される。ここで  $I_n$  はノミナルヨー軸慣性モーメント、 $N_{in}$  はノミナル化されたプラントへのヨーモーメント入



Fig. 3 Experimental electric vehicle.

Table 1 Vehicle specifications.

Vehicle Mass $m$	870 kg
Yaw axis inertia moment $I$	617 kg·m <sup>2</sup>
Distance from CG to axle $l_f, l_r$	1.00, 0.70 m
Front tread width $d_f$	1.30 m
Tire Radius $r$	0.30 m
Cornering stiffness $C_f, C_r$	10000, 23600 N/rad
Maximum torque of front IWM	500 Nm (short time)

力である。

YMO によりノミナル化されたプラントを用いてヨーレート制御系を構成する。制御系は二自由度制御とする。フィードバックコントローラは比例制御として  $-p$  rad/s に極配置する。

$$C_{FB}(s) = K_p \quad (16)$$

$$K_p = I_n p \quad (17)$$

駆動力差モーメント  $N_z$  は下式の配分則により左右輪駆動力に配分する。

$$\begin{bmatrix} F_{fl} \\ F_{fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{d_f} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{d_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ N_z \end{bmatrix} \quad (18)$$

ここで  $F_{fl}, F_{fr}$  はそれぞれ左前輪・右前輪駆動力、 $d_f$  は前輪トレッド幅、 $F_x$  並進方向駆動力である。

提案する後輪横滑り角零化制御系のブロック線図を Fig. 2 に示す。なお、本報では後輪横滑り角零化についてのみ述べたが、同様の手法で前輪横滑り角零化制御を構成することができる。すなわち、前輪舵角を 0 に固定し、後輪舵角に応じたヨーレート指令値を生成して YMO によるヨーレート制御を行なうことで前輪横滑り角が零に制御される。

## 4. シミュレーションおよび実験

### 4.1. 実験車両

本報では実験車両として著者らの研究グループで製作した電気自動車 FPEV2-Kanon を使用する。当車両は四輪すべてにダイレクトドライブ型インホイールモータを搭載しており、4 輪の制駆動力を独立に制御することができる。左右の駆動力差を用いることでヨーモーメントを発生させることができる。本報では前輪インホイールモータのみを用いる。ステアリング機構は前輪・後輪ともに駆動モータを搭載しており、ステアパイワイヤとして自動操舵することができる。本報では前輪ステアリングを自動操舵する。

実験車両の外観を Fig. 3 に、車両諸元を Table 1 に示す。コーナリングスティフネスは後述の実験において通常の前輪操舵時にヨーレートと車体横滑り角がシミュレーション結果と一致するように定めた。

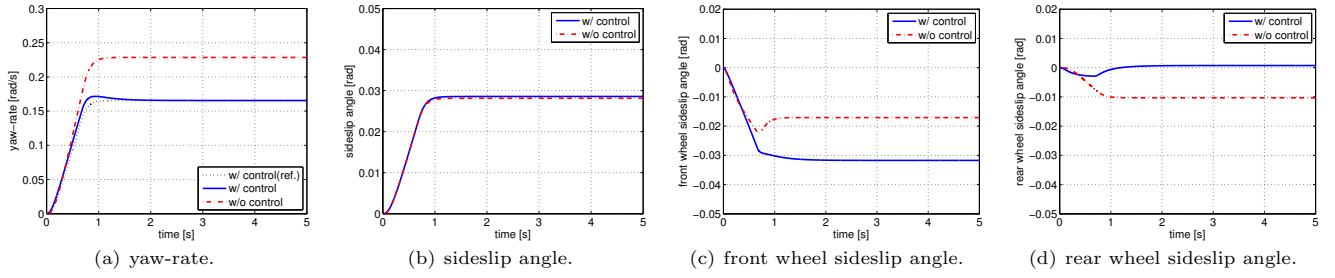


Fig. 4 Zero wheel-sideslip control simulation results.

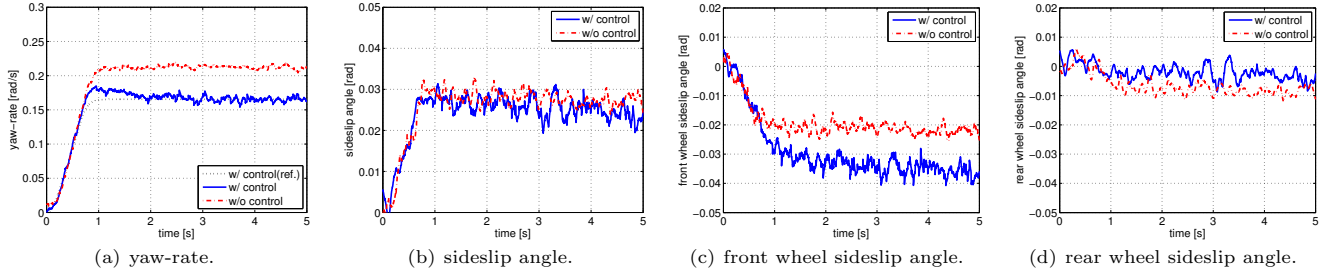


Fig. 5 Zero wheel-sideslip control experimental results.

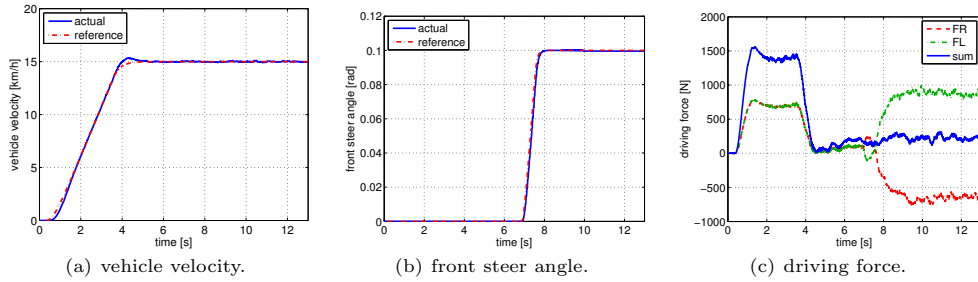


Fig. 6 Cornering resistance measurement experimental results.

#### 4.2. シミュレーション

提案法の有効性をシミュレーションにより確認する。車両速度は 15km/h で一定とする。前輪舵角は操舵速度 0.15 rad/s で舵角 0.1 rad に操舵する。車両モデルには二輪車両モデルを用いてヨーレート、車両横滑り角、車輪横滑り角をシミュレーションした。YMO のローパスフィルタのカットオフ周波数は 10 rad/s, YMO のゲイン  $K_{YMO}$  は 1.0, フィードバックコントローラの極は -10 rad/s とした。なお、本条件においては  $G_{\delta_f}^{\beta}(0) = 0.281$  であり、ヨーレート目標値は  $\gamma^* = 0.167$  rad/s である。一方、非ヨーレート制御時のヨーレート定常応答<sup>(6)</sup>は  $G_{\delta_f}^{\gamma}(0) \delta_f = 0.229$  rad/s であるので、提案制御法は通常操舵に比べてヨーレートを低減させる、すなわち同じ前輪舵角に対して旋回半径が大きくなるような制御がなされる。

シミュレーション結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) はヨーレート、(b) は車体横滑り角、(c) は前輪横滑り角、(d) は後輪横滑り角である。Fig. 4(a) より提案制御法においてヨーレートが指令値に追従していることがわかる。このとき車体横滑り角は制御の有無でほとんど変化しておらず、YMO によりヨーレートと横滑り角を非干渉的に制御できていることが分かる。Fig. 4(d) より定常状態において提案制御法により後輪横滑り角の零化が実現されている。一方、前輪横滑り角の絶対値は提案制御法により増大している。

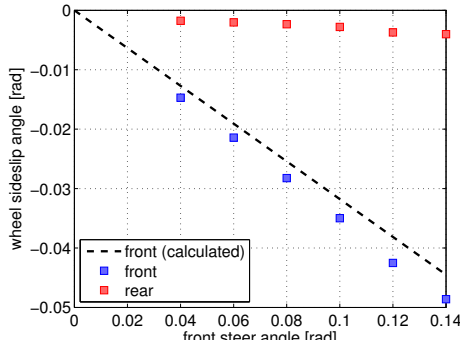
#### 4.3. 実験

シミュレーションと同条件で実験を行なった。車両速度はフィードバック制御 (PI 制御) により 15 km/h に保つ。実験においては前輪インホイールモータを駆動し、車両速度は後輪車輪速を換算して求める。ヨーレート  $\gamma$  はジャイロセンサにより測定し、ノイズ低減のためカットオフ周波数 20 rad/s のローパスフィルタを適用した。車両横滑り角  $\beta$  はオブザーバ<sup>(9)</sup>により推定し、 $\beta$  の推定値と  $\gamma$  の測定値と実前輪舵角  $\delta_f$  より (1) 式、(2) 式を用いて車輪横滑り角を求めた。実験結果を Fig. 5 に示す。ヨーレートはシミュレーション同様目標値に追従しており、制御なしに比べヨーレートが小さく抑えられている。また車両横滑り角は制御の有無によらずほぼ同じ値となっている。Fig. 5(d) より提案制御法により後輪横滑り角は完全ではないもののゼロに近く制御されていることが分かる。また、前輪横滑り角は制御により絶対値が増大している。

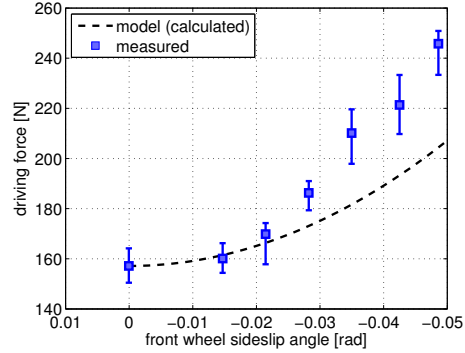
提案する制御法はヨーレートの目標値を生成してフィードバック制御する方法であり、車輪横滑り角に対してはフィードフォワード的な方法であるため、パラメータ誤差の影響が避けられないものの、後輪横滑り角の零化に対して一定の効果が得られることを確認した。

#### 4.4. 提案法によるコーナリング抵抗の測定

提案法を用いて後輪車輪横滑り角を零化し、コーナリング抵



(a) front steer angle vs. wheel-sideslip angle.



(b) front steer angle vs. driving force.

Fig. 7 Cornering resistance measurement results(with proposed method).

抗を測定する．駆動力の測定には駆動力オブザーバ (Driving Force Observer: DFO) <sup>(10)</sup> を用いる．車輪一輪あたりの運動方程式は

$$J\dot{\omega} = T - rF_d \quad (19)$$

と書ける．ここで  $J$  は車輪の慣性モーメント， $T$  はモータトルク， $r$  は車輪半径， $F_d$  は駆動力である．したがって駆動力は下式の駆動力オブザーバで推定できる．

$$\hat{F}_d = \frac{T - J\dot{\omega}}{r} \quad (20)$$

モータトルクは指令値に対して十分速く追従すると仮定し，上式の計算にはモータトルク指令値を用いる．

実験ではまず，一定速度 (15 km/h) で直進走行時の走行抵抗を DFO で測定する．次に，提案法で後輪横滑り角を零化して定常円旋回を行ない同様に DFO で走行抵抗を測定する．したがって直進時と旋回時の駆動力の差分がコーナリング抵抗に相当する．前輪舵角は 0.04 rad から 0.14 rad まで 0.02 rad 毎測定した．最大舵角を 0.14 rad としたのは前輪インホイールモータの最大トルクによる制限のためである．旋回時の走行抵抗は定常状態の 4 秒間の平均とし，各条件で 5 回ずつ実施する．

Fig. 6 に前輪舵角 0.10 rad における実験結果を示す．Fig. 6(a) は車両速度，(b) は前輪舵角，(c) は前輪駆動力推定値である．旋回時においても車両速度が一定に保たれており，駆動力が正しく推定できていることが分かる．

Fig. 7(a) に前輪舵角と前後輪の車輪横滑り角を示す．前輪横滑り角は前輪舵角に対して比例的に増加しており，(13) 式で求められる理論値と近い値が得られている．また，後輪横滑り角は前輪舵角が大きくなってもゼロに近い値となっており，提案制御法が有効に動作していることが分かる．Fig. 7(b) に前輪横滑り角と駆動力の関係を示す．測定値のエラーバーは 5 回の試行における最大値と最小値を示している．駆動力の理論値は (7) 式により計算し，前輪舵角が 0 のときの測定値を加算した値である．

駆動力の理論値と測定値を比較すると，前輪横滑り角に対する傾向は一致しており，前輪横滑り角の二乗比例の傾向が見られる．ただし，前輪横滑り角が大きくなるほど誤差が大きくなっている．原因としてはコーナリングスティフネスの誤差や，左右輪でのコーナリングスティフネスの違いなどが考えられる．また，本実験では前輪舵角により旋回半径が異なり走行で通過する路面を統一できず，駆動力の絶対値が小さいため路面の凹

凸や傾斜による影響を受けてしまっていると考えられる．一方，提案法によるコーナリング抵抗の測定では旋回による荷重移動の影響等を含めて測定できるため，タイヤ試験機を用いた方法に比べて優位な点があると考えられる．

## 5. まとめ

本報ではコーナリング抵抗モデルの検証のため，電気自動車のヨーレート制御を用いた車輪横滑り角零制御を提案し実験により有効性を示した．さらに提案法を用いてコーナリング抵抗を測定し，提案するコーナリング抵抗モデルとおおむね一致する傾向が得られた．

今後の課題としてはコーナリングスティフネスの推定法と組み合わせた測定精度の向上や，前輪車輪横滑り角を零化しての実験が挙げられる．

## 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) によって行われたことを付記する．

## 参考文献

- (1) 原田信吾, 藤本博志: “電気自動車におけるスリップ率とモータ損失を考慮した前後輪制駆動力配分による加減速時の航続距離延長制御”, 電気学会論文誌 D, Vol.134, No.3, pp.1-8, 2014
- (2) 角谷勇人, 藤本博志: “前後輪横滑り角と左右トルク配分に基づく電気自動車の航続距離延長制御システム”, 電気学会論文誌 D, Vol.132, No.3, pp.308-314, 2012
- (3) 米俊宏, 郡司大輔, 藤本博志: “前後輪アクティブステアを用いた任意操舵における電気自動車の航続距離延長法の提案”, 電気学会研究会資料, CT2013(47-56), pp.37-42, 2013
- (4) 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, pp.63-66, 2011
- (5) 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”, 2013 年自動車技術会春季学術講演会前刷集, No.70-13, pp.9-14, 2013
- (6) 安部正人: “自動車の運動と制御 車両運動力学の理論形成と応用”, 東京電機大学出版局, 2008
- (7) 酒井秀樹, 宮田繁春, 竹原伸: “後輪横力零化 DYC 制御”, 2013 年自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No.120-13, pp.1-4, 2013
- (8) 安藤直樹, 藤本博志: “電気自動車の後輪独立制駆動力配分とアクティブ前後輪操舵を用いたヨーレート制御”, 電気学会論文誌 D, Vol.131, No.4, pp.616-623, 2011
- (9) 青木良文, 堀洋一: “電気自動車における車体すべり角オブザーバのロバスト化と実車データによる検証”, 電気学会論文誌 D, Vol.125, No.5, pp.467-472, 2005
- (10) S. Sakai, H. Sado, Y. Hori: “Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors”, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, Vol.4, No.1, pp.9-16, 1999