

## 156-20135199 左右独立駆動可能な電気自動車の運動制御\*

前田 健太<sup>1)</sup> 藤本 博志<sup>2)</sup>

## Motion Control of Left- and Right-Independent-Driven Electric Vehicles

Kenta Maeda Hiroshi Fujimoto

The authors' research group has improved performance of electric vehicles (EVs) such as safety, comfortability and efficiency with in-wheel motors control methods. The in-wheel motor, however, has not been a general style of commercialized EVs' motors. Most commercialized EVs today adopt on-board motors, which have less controllability than in-wheel motors have. Even though the on-board motors have some limit of controllability, the authors' control methods can be attached to these kinds of motors. This paper, therefore, reports the latest research results of applying the motion control methods to a left- and right-independent-driven EV with two on-board motors and driveshafts.

**KEY WORDS:** (Standardized) Vehicle Dynamics, (Free) Motion Control, Traction Control, Yaw-rate(B1)

## 1. はじめに

近年、電気自動車の技術革新はめざましく、車両運動に関するさまざまな制御手法が提案されている<sup>(1)~(4)</sup>。著者らの研究グループでも、これまで電気自動車の高い制御性<sup>(5)</sup>を生かした車両運動制御手法を多数提案してきた。その中で、トラクション制御として駆動力制御法<sup>(6)</sup>、また車体姿勢安定化を主目的としてヨーモーメントオブザーバ<sup>(7)</sup>に基づくヨーレート制御法を提案した。

著者らがこれまで提案してきたさまざまな手法は、オリジナル電気自動車「FPEV2-Kanon」を用いて実証してきた。本車両は4輪にダイレクトドライブ方式のインホイールモータ搭載が搭載されており、ギヤのバックラッシュおよびドライブシャフトのねじれ共振などがなく、駆動部の特性は非常に理想的で制御性が高い。しかしながら、インホイールモータの開発が進んでいないもの<sup>(8)(9)</sup>、現状の市販車ではまだまだ車載モータ方式が主流である。そこで本稿では、より市販車に近い車載モータ搭載電気自動車に対し、提案手法が適用可能であることを示す。

著者らはすでに、前後輪にデファレンシャルギヤとドライブシャフトを搭載した電気自動車に対する制御を試みた実績がある<sup>(10)</sup>。本稿では、車載モータとドライブシャフトが左右輪に独立配置された後輪駆動電気自動車に対し、駆動力制御法およびヨーモーメントオブザーバを適用し、その有効性を確認したので報告する。

## 2. 実験車両および駆動系の特性確認

## 2.1. 実験車両

本稿では、実験車両として5人乗り電気自動車を用いた。この車両は図1に示すように後輪に左右独立してモータ、減速ギヤ、ドライブシャフトが搭載されており、左右独立駆動が可能である。また、「FPEV2-Kanon」と比べて市販車の形に近く、より実用的な条件での実証実験が可能である。

本車両は左右独立駆動可能であるが、減速ギヤおよびドライブシャフトを搭載しており、インホイールモータ搭載車と比べて車輪速度制御帯域が制限されることが予想される。そこで次章

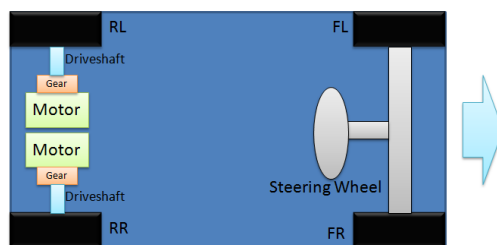


Fig. 1 Structure of the experimental vehicle.

では、駆動力制御法の帯域に大きな影響を与える駆動系の車輪速度制御帯域を確認する。なお、駆動系を剛体とみなせばモータ速度と車輪速は常にギヤ比  $g_{ir} : 1$  の関係となることから、モータ速度制御と車輪速度制御は等価である。

## 2.2. モータ軸まわりのイナーシャ測定

車輪速度制御系の設計にあたって、駆動系のプラント、すなわちモータトルクからモータ速度までの伝達関数を取得する必要がある。モータトルク  $T_m$  とモータ速度  $\omega_m$  の間には、抵抗を無視すると(1)式に示す運動方程式が成立する。

$$J\dot{\omega}_m = T_m \quad (1)$$

したがって、一定のモータトルク  $T_m$  を加えた際のモータ速度の時間変化  $\dot{\omega}_m$  より、駆動系のイナーシャ  $J$  は  $T_m/\dot{\omega}_m$  として算出可能である。

実験車両について、駆動系のイナーシャを左右輪について測定した結果を図2に示す。それぞれ図2(a)が与えたモータトルク、図2(b)がこのときのモータ速度である。図2(c)、2(d)はその時々々の  $T_m/\dot{\omega}_m$  の値を示しており、車輪速が0から正の値となる領域、ここでは1~1.5秒における値を駆動系のイナーシャとして同定した。ここでは同定値を波線で示している。

## 2.3. ジャッキアップ時の車輪速度制御帯域

前節で得られた駆動系のイナーシャを用いて車輪速度制御系を構築した。車輪速の比例積分コントローラはプラント  $1/J_s$  に対して重根配置で極設計を行い、帯域確認においてはこの極を徐々に上げていくことで発散せず制御可能な上限値を得た。

図3に車輪速度制御の動作試験結果を示す。ここでは50 rad/s、時定数0.2 secの一次遅れをモータ速度指令値として与えている。図3(a)ではPIコントローラの極を-14 rad/sに設定し

\*2013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) 2) 東京大学 (227-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

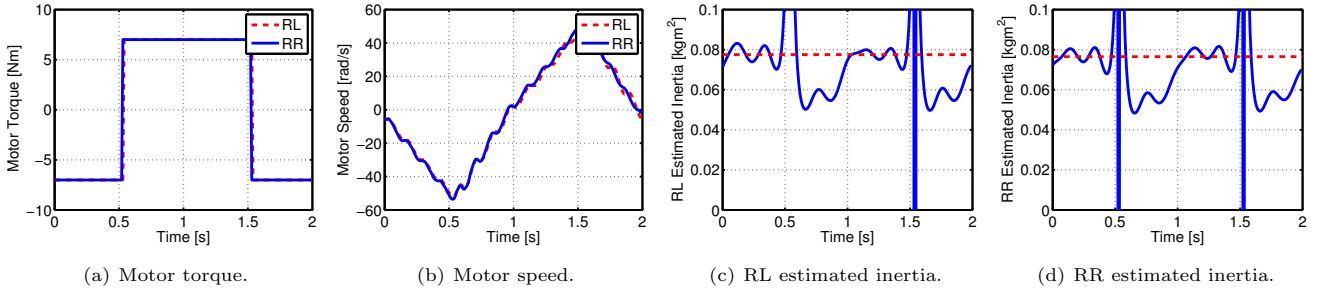


Fig. 2 Inertia estimation results.

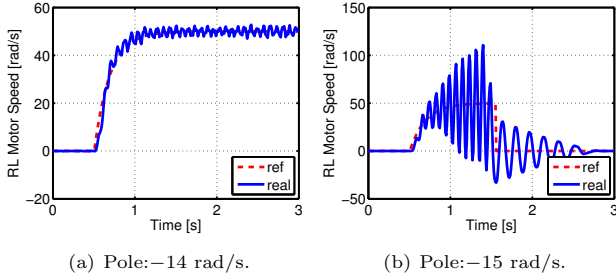


Fig. 3 Results of wheel-speed control.

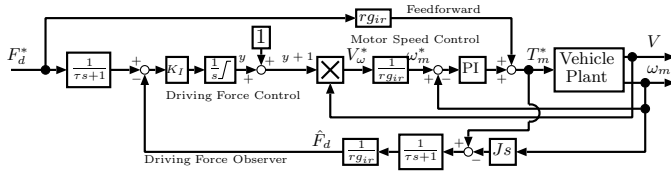


Fig. 6 Block diagram of Driving Force Control.

しており、モータ速度は発散することなく指令値に追従している。これに対し、図 3(b) では PI コントローラの極を  $-15 \text{ rad/s}$  に設定しており、モータ速度指令値の発生と同時にモータ速度が振動、発散していることが分かる。本試験より、車輪速制御の上限は  $-14 \text{ rad/s}$  と判明した。

### 3. タイヤの $\mu$ - $\lambda$ 特性取得

実験車両が装着するスタッドレスタイヤの  $\mu$ - $\lambda$  特性を取得した。図 4 に取得方法を示す。図 4(a) のように一定スリップ率を指令値として車輪速制御を行い、図 4(b) のように駆動力を推定する。そして、センサにより取得した前後加速度、あらかじめ取得しておいた静止加重および重心高からその時々垂直荷重を算出し、駆動力を垂直荷重で除することで摩擦係数を算出した。また、車体速は非駆動輪である前輪の左右タイヤ速度平均値より取得した。

図 5 に低  $\mu$  路における  $\mu$ - $\lambda$  特性計測結果を示す。ここではスリップ率指令値を  $-0.1 \sim 0.1$  の範囲で少しずつ変化させて繰り返し走行し、それぞれの走行について時速  $30 \text{ km/h}$  から 3 秒間のスリップ率および摩擦係数の平均をとってプロットした。左右で特性の差はほとんどなく、スリップ率  $\pm 0.05$  付近で摩擦係数が最大となっていることから、粘着状態と動摩擦領域の境界となる粘着限界スリップ率が  $\pm 0.05$  程度であることが判明した。

## 4. 駆動力制御法による低 $\mu$ 路走行試験

### 4.1. 試験方法

図 6 に駆動力制御法のブロック図を示す<sup>(6)</sup>。外側が駆動力オブザーバに基づく駆動力ループとなっており、内側にスリップ

Table 1 Comparison of acceleration.

Slip Ratio Limitation Number of Trials \	Acceleration [ $\text{m/s}^2$ ]	
	0.2	0.05
1	0.6658	0.8292
2	0.7171	0.8085
3	0.7094	0.7583
4	0.7342	0.7324
5	0.6107	0.7328
Average	0.6875	0.7722

率を制御する車輪速制御系が存在する。  $y$  はスリップ率指令値に相当する操作量であり、ここに上限値および下限値を設けることでトラクション効果を実現する。

3 章で取得した  $\mu$ - $\lambda$  特性より、粘着限界スリップ率は  $\pm 0.05$  程度であった。本研究室が提案してきた駆動力制御法は粘着限界スリップ率が  $\pm 0.2$  程度であるとみなしてきたが<sup>(6)</sup>、3 章での解析よりスリップ率 0.2 は動摩擦領域に突入しており、上限値を 0.05 に設定した場合と比べて低  $\mu$  路上での走行安定性は低下すると考えられる。そこで本章では、低  $\mu$  路における加速試験を実施し、トラクション制御なし、駆動力制御法を適用 (スリップ率上限値 0.2)、駆動力制御法を適用 (スリップ率上限値 0.05) の 3 通りで比較を行った。

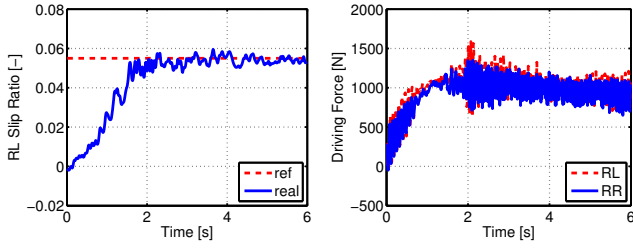
駆動力指令値  $F_d^*$  はドライバがアクセルにより適当に与え、インナーループである車輪速制御系の PI コントローラの極は余裕をもって  $-10 \text{ rad/s}$  に設定した。また、アウターループである駆動力制御系の積分器ゲインは 0.001 に設定し、車体速は非駆動輪である前輪の左右タイヤ速度平均値より取得した。

### 4.2. 試験結果

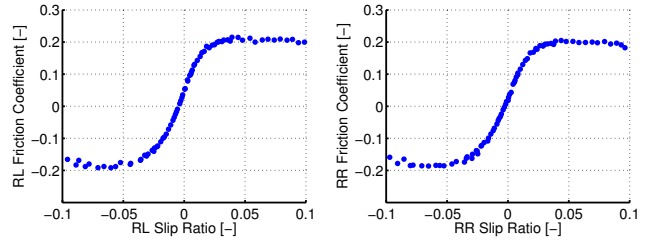
それぞれの走行試験結果を図 7, 8 および 9 に示す。いずれも左後輪の駆動力、左右輪のスリップ率を示す。トラクション制御を適用しない場合、図 7(a) においてドライバがアクセルを踏んで加速した時、図 7(b) の 3.5 秒すぎから低  $\mu$  路にさしかかってスリップ率が增大し、ドライバは 3.8 秒においてアクセルをゆるめている。その後もスリップ率が增大するたびにドライバはアクセルをゆるめる動作を繰り返している。これに対し、駆動力制御法を適用した走行では、図 8(a) および図 9(a) より高  $\mu$  路上では駆動力が指令値に追従し、2 秒以降の低  $\mu$  路上では駆動力が飽和、スリップ率があらかじめ設定した上限値に制御されている。

### 4.3. 加速度による比較

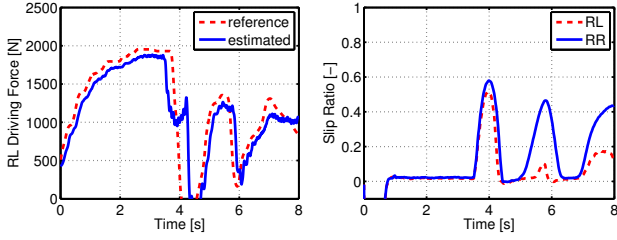
駆動力制御法を適用した走行を 5 回を行い、それぞれにおいて低  $\mu$  路に突入の後、車体速  $40 \text{ km/h}$  を超えた瞬間から 3 秒間の平均加速度を算出した結果を表 1 に示す。一番下のセルに示した 5 回の平均加速度の平均値より、スリップ率上限値 0.2 の



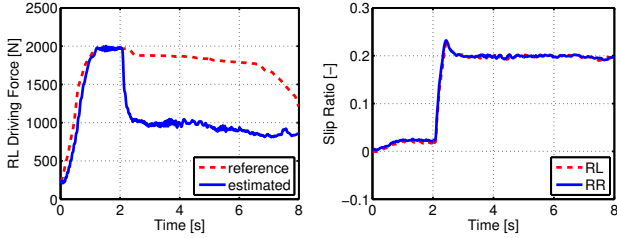
(a) RL slip ratio. (b) Driving force.  
Fig. 4 Slip ratio reference 0.055.



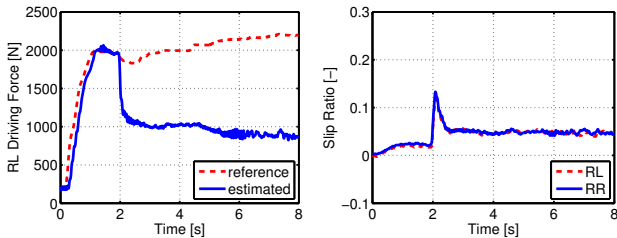
(a) RL  $\mu$ - $\lambda$  relationship. (b) RR  $\mu$ - $\lambda$  relationship.  
Fig. 5 Obtained  $\mu$ - $\lambda$  relationship.



(a) RL driving force. (b) Slip ratio.  
Fig. 7 Low- $\mu$  test without traction control.



(a) RL driving force. (b) Slip ratio.  
Fig. 8 Low- $\mu$  test with DFC (limit:0.2).



(a) RL driving force. (b) Slip ratio.  
Fig. 9 Low- $\mu$  test with DFC (limit:0.05).

場合に比べてスリップ率上限値 0.05 の場合は加速度が 12% 大きくなっており、低  $\mu$  路においてタイヤ力増大に成功している。このことは、加速においては上り勾配等の加速力が欲しい場面より大きな加速力が得られ、減速においては制動距離減少を意味することから、低  $\mu$  路上での緊急制動時の安全性がより高まるといえる。なお、横方向安定性に関して、ドライバーからは「スリップ率上限値 0.2 では高い速度域で車体が横に振られる感覚があったが、スリップ率上限値 0.05 ではその感覚がほとんどなかった」というコメントを得た。

## 5. ヨーモーメントオブザーバによる旋回試験

本実験で使用した電気自動車は左右独立駆動可能であることから、左右輪の駆動力差により直接ヨーモーメント制御を行うヨーモーメントオブザーバが有効であると考えられる。そこで本稿ではヨーモーメントオブザーバの動作確認を行い、高  $\mu$  路での旋回試験において車両のニュートラルステア化が実現可能であることを示す。

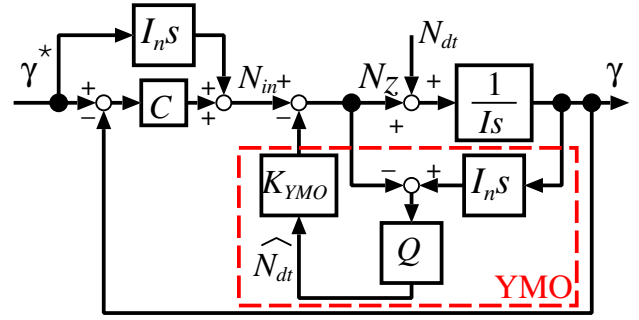


Fig. 10 Block diagram of Yaw-Moment Observer.

### 5.1. ヨーモーメントオブザーバを用いたヨーレート制御法

図 10 にヨーモーメントオブザーバ (Yaw-Moment Observer: YMO) を用いたヨーレート制御法のブロック図を示す<sup>(7)</sup>。波線に囲まれた部分が YMO であり、 $Q$  はカットオフ周波数  $\omega_c$  [rad/s] の一次ローパスフィルタである。 $\omega_c$  より低い周波数域では外乱  $N_{dt}$  が抑圧されるとともに制御入力  $N_{in}$  からヨーレート  $\gamma$  までのプラントが  $1/I_n s$  にノミナル化される。ここで  $I_n$  は重心軸まわりの車体のノミナルイナーシャである。アウトループのヨーレート制御コントローラ  $C$  は比例制御器とし、ノミナルプラント  $1/I_n s$  に対して極配置法により決定する。 $N_z$  は左右の駆動力差により生成するヨーモーメントである。左右輪のモータトルク  $T_{mrl}$ ,  $T_{mrr}$  は左右輪の合計駆動力指令値  $F_{dall}^*$ , 駆動力差モーメント  $N_z$ , モータ軸と車輪軸のギヤ比  $g_{ir}$ , 車輪半径  $r$ , 後輪のトレッド幅  $d_r$  より (2) 式に従って生成する。

$$\begin{aligned} T_{mrl} &= \frac{r}{g_{ir}} \left( \frac{1}{2} F_{dall}^* - \frac{1}{d_r} N_z \right) \\ T_{mrr} &= \frac{r}{g_{ir}} \left( \frac{1}{2} F_{dall}^* + \frac{1}{d_r} N_z \right) \end{aligned} \quad (2)$$

また、ヨーレート指令値  $\gamma^*$  は (3) 式により決定する。

$$\gamma^* = \frac{1}{1 + AV^2} \cdot \frac{V}{l} \cdot \frac{1}{\tau_\gamma s + 1} \delta_f \quad (3)$$

ここで  $A$  はスタビリティファクタを表し、 $A = 0$  のときはニュートラルステア、 $A > 0$  でアンダーステア、 $A < 0$  でオーバーステアとなる。また、 $\tau_\gamma$  は操舵に対するヨー運動の遅れ時定数であり、 $A$ ,  $\tau_\gamma$  はそれぞれチューニングパラメータとする。

### 5.2. 旋回時のニュートラルステア化

YMO を用いたヨーレート制御法の有効性を示すため、旋回時のニュートラルステア化試験を行った。図 11 および図 12 に、ヨーレート制御法の有無で比較した走行試験結果を示す。ここではヨーレート制御法を用いない走行を従来法、YMO に基づくヨーレート制御法を用いた走行を提案法と定義する。(3) 式において  $A = 0$  に設定し、図 11(a), 12(a) に示すように徐々

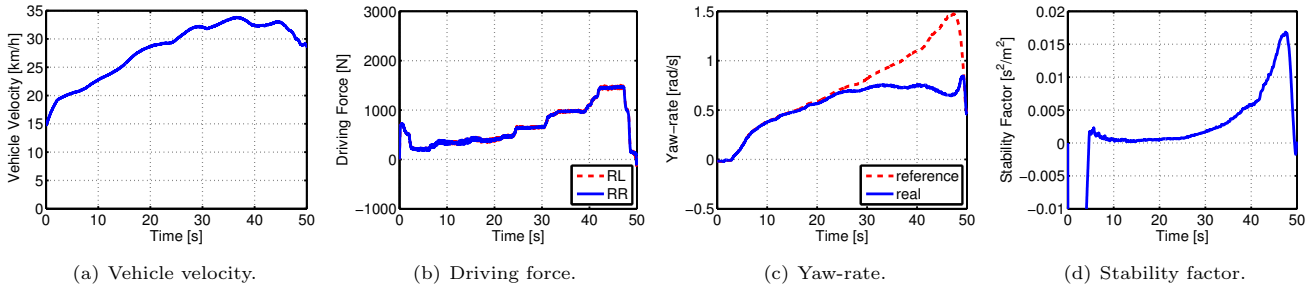


Fig. 11 Results of circling test without YMO.

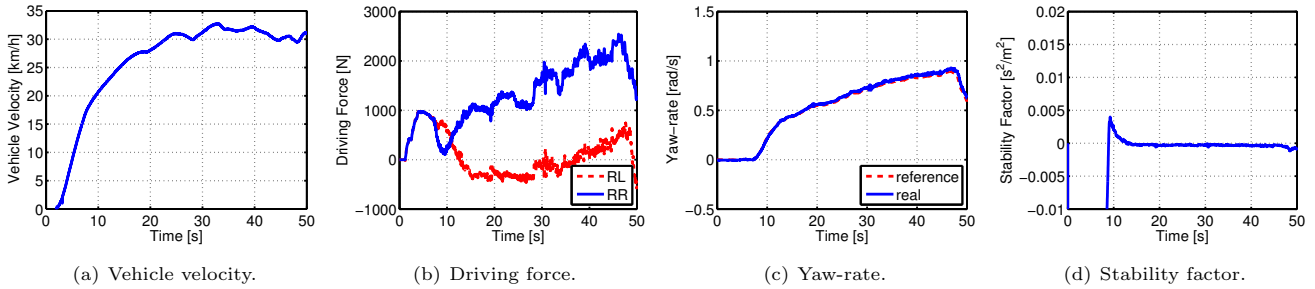


Fig. 12 Results of circling test with YMO.

に速度を上げ、同時にドライバは旋回半径が常にほぼ一定となるよう操舵を行った。

従来法では図 11(b) より左右輪で等しい駆動力を生成しており、駆動力差モーメントも発生していない。結果、タイヤの非線形領域に達した 20 秒以降は図 11(c) よりヨーレート指令値に対して実際値が小さくなっており、アンダーステアとなっている。それに対し、ヨーレート制御を適用した走行試験では図 12(b) より左右輪で駆動力に差を生じさせ、駆動力差モーメントを生成している。その結果、図 12(c) よりヨーレートが指令値によく追従しており、ヨーレート制御法の有効性が示されている。

(3) 式より、その時々スタビリティファクタ  $A$  は下式のようになる。

$$A = \frac{1}{V^2} \left( \frac{V\delta_f}{l\gamma} - 1 \right) \quad (4)$$

本式に基づき算出したスタビリティファクタを図 11(d)、12(d) に示す。従来法では図 11(d) より 20 秒以降にスタビリティファクタの値が大きく正に振れており、車両がアンダーステアとなっている。それに対し提案法では図 12(d) よりスタビリティファクタが常に 0 付近にとどまっており、ニュートラルステア化に成功している。運転を担当したドライバからは「YMO によって横加速度が大きい領域でも操舵に対して忠実にヨー運動が発生するようになった」というコメントを得た。

## 6. まとめ

著者らの研究グループはこれまで、トラクション制御として駆動力制御法、直接ヨーモーメント制御としてヨーモーメントオブザーバ提案し、インホイールモータ搭載電気自動車を用いて有効性を示してきた。本稿では、左右輪に車載モータとドライブシャフトを搭載した電気自動車に対してこれらの制御を適用し、より市販車に近い条件においても有効性が得られることを走行試験により示した。

試験にあたっては、まず駆動部のイナーシャおよび車輪速制御帯域を確認した。次に、タイヤの  $\mu$ - $\lambda$  特性を取得し、 $\mu$  のピークがスリップ率  $\pm 0.05$  付近に現れることを確認し、低  $\mu$

路における駆動力制御法を用いた走行によりトラクション効果を確認した。さらにはスリップ率上限値 0.2 と 0.05 の比較より、トラクション制御においてはタイヤの粘着限界スリップ率を正確に得ることの重要性が明らかとなった。最後にヨーモーメントオブザーバを用いた旋回試験を行い、旋回時のニュートラルステア化試験の結果からヨーレートを高性能に制御可能であることを示した。

## 謝 辞

本研究に関して多大なるご協力をいただいた本田技術研究所の森淳様、武田憲道様に対し、ここに記して深く感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

- (1) 苅込卓明, 伊藤健, 川村弘道, 久米智広: 新開発 EV 向けの高応答加速度制御, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 55-11, pp. 5-8 (2011).
- (2) 勝山悦生: インホイールモータによる非連性 3D モーメント制御の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 3-11, pp. 1-6 (2011).
- (3) 平賀直樹, 山門誠, 狩野芳郎, 安部正人: G-Vectoring 制御の消費エネルギーによる評価, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 63-12, pp. 23-26 (2012).
- (4) 加藤正浩, Yin, D.: 適応型モデル追従制御による電気自動車のスリップ抑制制御法, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 98-12, pp. 7-12 (2012).
- (5) Hori, Y.: Future vehicle driven by electricity and control—research on four-wheel-motored “UOT Electric March I”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 5, pp. 954-962 (2004).
- (6) 藤本博志, 吉村雅貴: 電気自動車におけるスリップ率制御に基づく駆動力制御法, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 3-11, pp. 11-14 (2011).
- (7) 藤本博志, 裙坂昭生, 野口季彦: 雪上路面における小型電気自動車の走行安定化制御, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 98-12, pp. 7-12 (2005).
- (8) 村田智史: インホイールモータ駆動ユニットの開発, 自動車技術会論文集, Vol. 42, No. 3, pp. 767-771 (2011).
- (9) 郡司大輔, 松田靖之, 田中一宇: 変速機構を有する EV 駆動ユニットの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 58-12, pp. 1-4 (2012).
- (10) 藤本博志, 江上奨, 前田健太, 齋藤潤, 半田和功: 安全性/快適性/航続距離向上のための前後輪独立駆動電気自動車の制御, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 10-12, pp. 5-8 (2012).