

小型電気自動車のヨーモーメント安定化制御法

齋藤 健生* 藤本 博志 野口 季彦
(長岡技術科学大学)

Yaw-Moment Stabilization Control of Small Electric Vehicle

Takeo Saito, Hiroshi Fujimoto, and Toshihiko Noguchi
(Nagaoka University of Technology)

Abstract

In this paper, novel direct yaw moment control is proposed for the electrical vehicle with two in-wheel motors. The proposed controller is composed of double disturbance observers. The inner-loop observer controls the vehicle traction, and the outer-loop observer stabilizes the yawing motion. The advantages of these approaches are 1) the stability robustness for road condition is guaranteed and 2) the proposed controllers require no immeasurable parameters. Moreover, the simulations and experiments demonstrate the performance of these controllers for snowy condition.

キーワード：電気自動車，ヨーモーメント，車両姿勢制御，外乱オブザーバ，駆動力制御

(electric vehicle, yaw-moment, vehicle stability control, disturbance observer, traction control)

1. はじめに

電気自動車 (EV) は環境問題やエネルギー問題の面から優れた利点を有しているため，社会的な普及に対する期待が大きい。しかし，内燃機関自動車 (ICEV) との価格差が当分埋め難いと考えられることから，ICEV とは一線を画した新分野における活用が期待される。この新分野として，都市部や地域の交通システムの一翼を担う EV コミューターカーやセカンドカー，高齢者用車両 (シルバービークル) などが挙げられ，それらの導入が今後一層進むと予想される。特に，宅配業務，高齢者用車両などの用途では比較的低価格の一人乗り小型 EV が多用されると思われる^[1]。このような小型 EV を寒冷地で使用する場合，雪面や氷面での走行が多くなるため，走行中スリップやスピンなどの危険が伴う。このため，制動力及び駆動力制御や車両姿勢制御は，安全運行のために重要な要素技術であると考えられる。

一方，EV の制動力及び駆動力制御や車両姿勢制御に関してはすでに多くの研究が行なわれており，高速なトルク応答や分散配置が可能であることなどモータ駆動の優位性を生かし，ICEV よりも高度な車両姿勢制御が行えるとされている^[2]。しかし，これらの制御法や ICEV で行なわれている車両姿勢制御は，測定や推定が困難なパラメータを用いた車両モデルに依存している^{[2][3]}。特に，車両すべり角，車両速度，コーナリングフォースをいかにして正確に測定・推定するかは大きな問題である。

そこで，本論文では並進方向の制御を司るインナール

ープと回転方向の制御を担うアウトーループの二重ループ構造を有し，いずれの制御ループにも外乱オブザーバを適用した新しい EV 車両姿勢制御方法を提案する。並進方向を制御するインナーループについては，外乱オブザーバに基づく新しいアンチスリップ制御法を提案し，路面状況の変化をプラントの変動と捉えることによりロバスト安定性を確保する。さらに，回転方向を制御するアウトーループにはヨーモーメントオブザーバを導入し，車両パラメータに依存しないシンプルな車両姿勢制御法を提案する。この提案法を，後輪に 2 つのホイールインモータを搭載し左右独立駆動が可能な小型 EV に実装して，実験とシミュレーションによりその有効性，問題点を検討した。

2. 外乱オブザーバに基づくアンチスリップ制御

2.1 並進方向運動方程式

Fig.1 において，完全粘着を仮定したときの前後並進運動に関する運動方程式は次のように記述される。

$$\left(J_w + Mr^2 \right) \frac{dw}{dt} = T \dots\dots\dots (1)$$

ただし，それぞれのパラメータは J : 車輪回転部分慣性モーメント， M : 車両重量， r : タイヤ半径， T : モータトルク， w : 駆動輪回転速度である。

(1)式括弧内の第二項は、車軸換算の車体慣性モーメントである。車輪空転現象が起これるとこの第二項は大きく減少し、見かけ上車両全体の慣性が小さくなったように振舞う。本論文ではこの現象を利用してアンチスリップ制御を行う。

2.2 車輪速制御と安定性

提案する外乱オブザーバによるアンチスリップ制御系を Fig.2 に示す。上述したように、本論文では路面の変化を慣性変動と捉え、それを車両モデルの乗法的誤差として考えたと次式が得られる。

$$\frac{1}{J_s} = \frac{1}{J_n s} (1 + \Delta) \dots \dots \dots (2)$$

J_n は車輪と車体を合わせた回転部分の慣性を各駆動輪単位に変換したノミナル値であり、タイヤが粘着状態にあるときの慣性モーメントである。一方、 J はプラントの慣性モーメントであり、車輪粘着時は(1)式括弧内に相当し、車輪空転時は J またはそれに近い値になる。また Δ はプラントの変動で、

$$\Delta = \frac{J_n - J}{J} \dots \dots \dots (3)$$

とする。このプラントを外乱オブザーバによりノミナル化することによりアンチスリップ制御を実現する。従来のロボットやモータのロバスタサーボ系ではノミナル慣性を実際の動作点に近い値かやや小さめの値に選ぶため、

は零に近い値か負の値をもつが、提案するスリップ制御では J_n が車体全体の慣性である一方、空転時の J は車輪のみの慣性となるため Δ は極めて大きな正の値となる。

Fig.2 はプラント $P(s)$ と外乱オブザーバを表し、入力にはトルク指令 T^* 、外乱トルク T_{dis} 、センサノイズ n で出力は車輪回転速度 w となっている。この Fig.2 について変形すると Fig.3 のようになる。Fig.3 について Δ に対するロバスタ安定性を考える。図より車輪空転が発生したときの閉ループ系の特性方程式は、

$$t_i s + 1 - K\Delta = 0 \dots \dots \dots (4)$$

と導かれる。これより極は、

$$s = \frac{K\Delta - 1}{t_i} \dots \dots \dots (5)$$

と求められる。前述のように、空転時の Δ は大きな正の値となるため通常の外乱オブザーバ ($K=1$) では極が正の値になることが分かる。従って、Fig.3 より空転時にポジティブフィードバックとなり不安定現象が発生する。この問題を回避するために、本論文では外乱オブザーバの出力端にゲイン K を導入する。空転時の安定性を保証するためには、

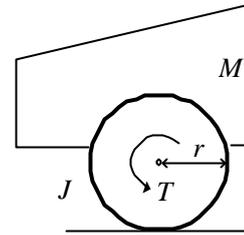


Fig.1 One-wheel vehicle model.

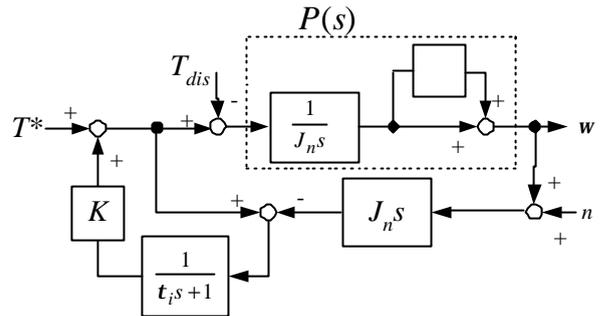


Fig.2 Block diagram of anti-slip control block.

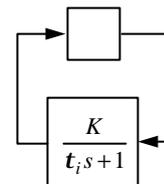


Fig.3 Equivalent block diagram of Fig.2.

$$K\Delta - 1 < 0 \dots \dots \dots (6)$$

より K は、

$$K < \frac{1}{\Delta} \dots \dots \dots (7)$$

と選ぶ必要がある。空転時の J はノミナルプラント J_n に対して小さい方向に変動するため、 Δ は極めて大きくなる。このため K をあまり大きく選ぶことはできない。

以上より、 K と t_i のチューニングに関する指針が得られた。さらに、Fig.4 に Fig.2 の等価ブロック線図を示す。これより外乱抑圧特性やノイズ抑圧特性も K 及び t_i により改善できる [7]。Fig.5 に示す感度関数 $S(s)$ 、相補感度関数 $T(s)$ の周波数特性の概略図より、相補感度関数については K によってゲインが調整でき、カットオフは $1/t_i$ で調整できる。感度関数についてもカットオフは $1/t_i$ で調整できる。また、低域の低感度化はロバスタ安定性を確保するためあきらめるが、この周波数は K によって決定される。従って、まず最初に(7)式に基づき、考え得る Δ の変動範囲内で安定性を確保するように K を決める。 t_i に関しては小さく選定する程高速で外乱に低感度な応答が得られるが、小さく選定しすぎると高調波共振モードによる励振やノイズに対して感度が上がり、離散化

の影響も顕著となる。これらのトレードオフを勘案して i を選定する。

本論文では、スリップ時に安定化を図るという目的から外乱オブザーバの出力端にゲインを導入したが、文献 [4] ではこのゲインが振動制御にも有効であることが示されている。また、本制御法は MFC (Model Following Control) [5] と本質的に等価であり、本論文で提案した安定解析法やチューニング方法が直接応用できる。

2.3 むだ時間補償

今回実験を行った制御システムは市販の EV に搭載されているインバータを使用したため、車両固有の問題として大きなむだ時間を有している。これは乗車フィーリングを向上させるためトルク指令に対して挿入されている 300ms 程度のローパスフィルタと、低分解能エンコーダによる 300ms 程度の検出遅れである。このため、システム全体ではワーストケースで 500~600ms のむだ時間要素をもつ。このむだ時間による影響を軽減するため、Fig.6 のようにオブザーバにむだ時間要素を挿入した。これによりモデル化誤差の影響が小さくなり、外乱抑圧推定特性の改善が見込める。

3 . ヨーモーメントオブザーバを用いた車両姿勢制御

3.1 車両運動方程式

車両モデルは Fig.7 に示したような四輪車を車軸に関して対称と仮定した二輪車モデルであり、車体のローリングを無視し、速度を一定とみなしている。このモデルについて車両の水平面内における運動方程式は次式となる [6]。

$$MV \left(\frac{db}{dt} + g \right) = 2Y_f + 2Y_r \dots\dots\dots (8)$$

$$I \frac{dg}{dt} = 2\ell_f Y_f - 2\ell_r Y_r \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 M は車両重量、 V は車両速度、 b は車両すべり角、 g はヨーレート、 I は車両慣性、 ℓ_f 、 ℓ_r はそれぞれ車両重心から前輪軸、後輪軸までの距離である。 Y_f 、 Y_r は前輪、後輪のコナリングフォースであり、タイヤの特性に依存する非線形パラメータである。

3.2 ヨーモーメントオブザーバ

上記の V 、 b を測定するには車両の実速度ベクトルが必要となる。さらにコナリングフォースについては非線形パラメータであるので、測定・推定は容易ではない。従って、これらのパラメータを使用した制御はその同定

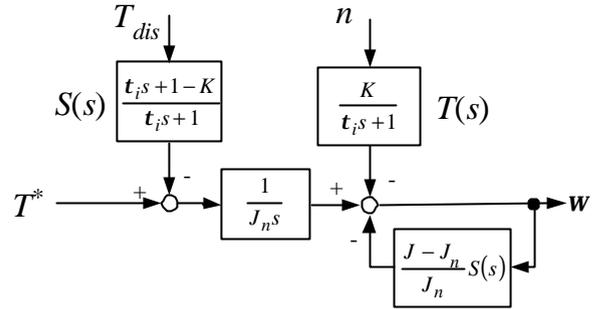


Fig.4 Sensitivity and complementary sensitivity functions.

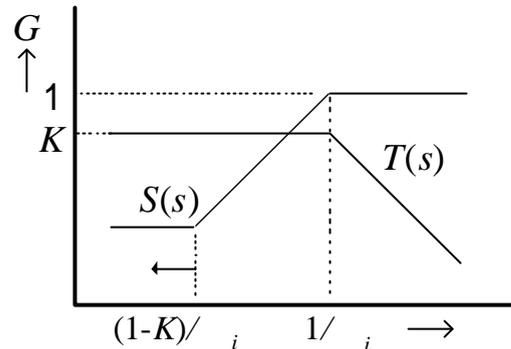


Fig.5 Bode diagram of sensitivity function and complementary sensitivity function.

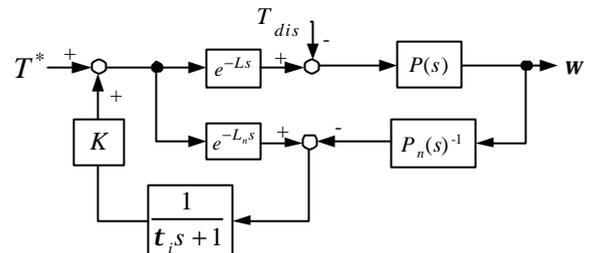


Fig.6 Block diagram of disturbance observer with time delay compensation.

精度に依存することは言うまでもない。本論文では、これらのパラメータによる影響を外乱ヨーモーメントと捉え、外乱オブザーバにより一括補償する制御法を考える。

すなわち (9) 式の右辺で表されるタイヤに発生するモーメントを N_i とし、さらに横風などによる外乱モーメントを N_d 、2 つのホイールインモータ駆動力差により生成される駆動力モーメントを N_z とすると、(9) 式は、

$$I \frac{dg}{dt} = N_z + N_i - N_d \dots\dots\dots (10)$$

と簡単化される。(10) 式について、ヨーレートを検出し Fig.8 に示すヨーモーメントオブザーバを構成すれば、外乱は抑圧され、

$$g = \frac{1}{I_n s} N_{in} \dots\dots\dots (11)$$

とノミナル化される。ただし、最もマイナーな制御系には先に述べたスリップオブザーバを用いた車輪速制御を施し、任意の駆動力モーメントが発生できるものとする。

また、すべり角 については直接制御を行っていないが、これは(8)式より、

$$\frac{db}{dt} = \frac{2Y_f + 2Y_r}{MV} - g \dots\dots\dots (12)$$

となり、制御を考えている高速雪上路面走行時では(12)式の右辺第一項は に比べ十分小さくなるので、 はの積分となり、その変化率は に比べて十分遅くなる。従って、 に関してフィードバック制御により安定化できれば、 に関しては人間の操舵により十分安定化できると考えられる。

本システムでは生成したモーメント制御入力 N_z を以下の方法で左右の車輪に駆動力配分する。

$$N_z = l_p(F_r^* - F_l^*) \dots\dots\dots (13)$$

$$T_{ac}^* = F_r^* + F_l^* \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 F_r^* : 右輪駆動力指令、 F_l^* : 左輪駆動力指令、 T_{ac}^* : アクセル指令である。(13),(14)式を解くことにより、左右の駆動力を決定することができる。さらに

$$T_r^* = rF_r, \quad T_l^* = rF_l \dots\dots\dots (15)$$

として、駆動モータに対する左右トルク指令を決定する。また、 l_p は各モータから重心までの距離であるが、 l_p の変動は等価的に l の変動とみなし、ロバストであると仮定して制御を行う。

4. シミュレーションによる検証

4.1 ヨーモーメントオブザーバの外乱抑圧特性

Fig.8 で構成されたブロックによりシミュレーションを行う。ただし、インナーloop (ASC) は完全な粘着状態と考えシミュレーションには組み込まず、プラントとして(8), (9)式を用いた。コーナリングフォース Y_f, Y_r については、

$$Y_f = -C_f \left(b + \frac{l_f}{V} g - d_f \right) \dots\dots\dots (16)$$

$$Y_r = -C_r \left(b + \frac{l_r}{V} g \right) \dots\dots\dots (17)$$

とする。 C_f, C_r は前後輪のコーナリングステイフネスを表し、文献[6]を参考に $C_f=C_r=9500$ [N/rad]とした。シミュレーション条件は $V=60$ km/h、 $M=400$ kg、 $l=1.26$ m、 $l_f=0.689$ m、 $l_r=0.591$ m とし入力舵角は 0.2 [rad]とする。この運転状況におけるシミュレーション結果を Fig.9 に示す。5~6s にかけて外乱モーメントが入力されているが、制御なし

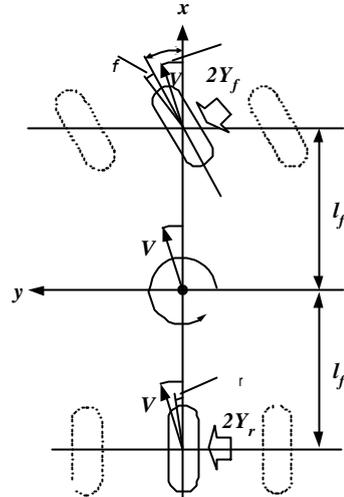


Fig.7 Equivalent two-wheel vehicle model.

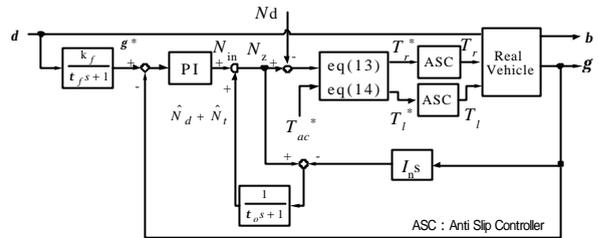


Fig.8 Block diagram of vehicle stability control.

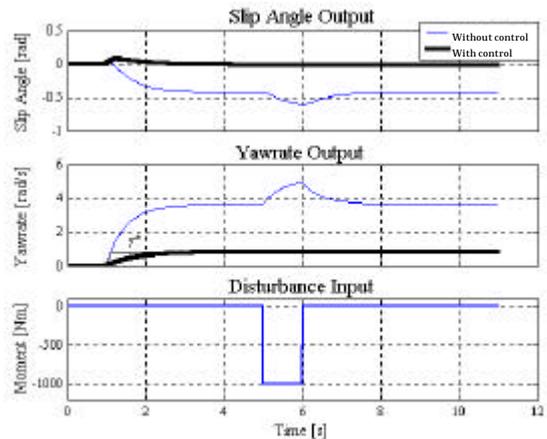


Fig.9 Simulation results of proposed method.

に比べて十分に外乱を抑圧できていることがわかる。

4.2 目標値応答特性

舵角 からヨーレート指令 * に至る伝達特性すなわち目標値応答特性を検証する。舵角フィーリングを決めるフィードフォワードモデルは、

$$G_{gd}(s) = \frac{k_f}{t_f s + 1} \dots\dots\dots (18)$$

とし、そのパラメータ J_f と k_f は実験で得られた値を参考に $J_f=0.05s, k_f=4s^{-1}$ と設定した。このシミュレーション結果が Fig.9 であり、目標ヨーレートである $\dot{\psi}^*$ に良好に追従することを確認できる。

5. 実験結果

5.1 実験システムの構成

実験システムの構成を Fig.10 に示す。実験機は市販の小型電気自動車（アラコ製 COMS）を使用している。この実験機は車両 ECU（Electronic Control Unit）とインバータ間でシリアル通信を行っており、車両 ECU はトルク指令、インバータは車輪速を出力する。この通信機能を利用し本実験では車両 ECU の代わりにノートパソコンにより車輪速を受けトルク指令を計算して出力する。このときのサンプリング周期は 15ms とした。

また、舵角センサとヨーレートセンサを実験機に取り付け、制御に必要な舵角 δ 、ヨーレート $\dot{\psi}$ を得ている。これらセンサの出力は A/D コンバータを介してノートパソコンのバッファメモリに格納している。

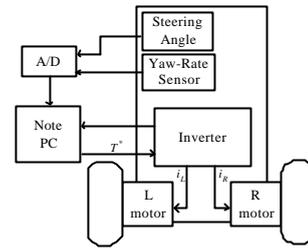


Fig.10 Configuration of experimental

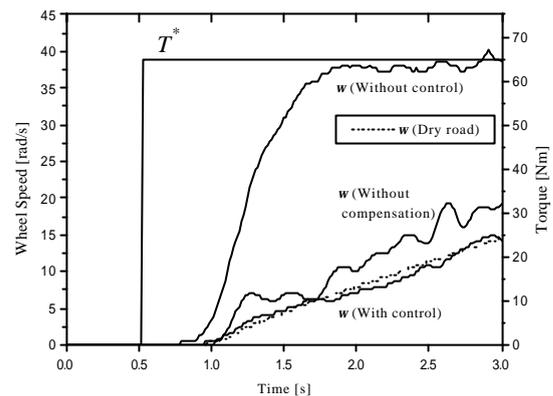


Fig.11 Experimental results of anti-slip control.

5.2 アンチスリップ制御の実験結果と考察

実験はアスファルト路面で行い、アスファルトが見えなくなるくらい十分に雪をまき滑る環境を作った。トルク指令はステップ入力とし、振幅は 65Nm、オブザーバの時定数は $T_o=0.3s$ とした。 J_n は実際に乾燥路面を走行させて同定を行い、その結果から $J_n=10.2Nms^2$ とした。前節で述べたように、 $1/J_n$ によって安定限界がわかるので、 J_n の計算を行う。 J_n の計算には空転時の J が必要となるがこの値は、実験により実際にタイヤが空転する状況を作り、タイヤが空転しているときの J を同定した。この実験により空転時の J は 1Nm とした。この J より J_n が計算でき、 $1/J_n=0.11$ となる。このためゲイン K の理論上限が 0.11 なので $K=0.1$ と設定した。また、2.3 で述べたとおりシステムのむだ時間を考慮してむだ時間補償も行うが、その補償量 L_n は 0.315s とした。これは実験を行う条件では平均 0.3s 程度の遅れを確認したためである。

Fig.11 と Fig.12 に実験結果を示す。どちらも雪路面でステップ状のトルク指令を入力した場合の車輪速を示している。Fig.11 は上から、制御なし、制御を行ったがむだ時間補償なし、制御を行いむだ時間補償も行った場合の各車輪速を示している。点線は乾燥路面での応答であり理想的な車輪速と言える。本制御を適用することにより非制御時にくらべ十分理想的な車輪速に近づけることができることと、むだ時間を挿入することにより更なる性能向上が図れることが確認できる。

一方、Fig.12 はゲイン K を変えた場合の実験結果であ

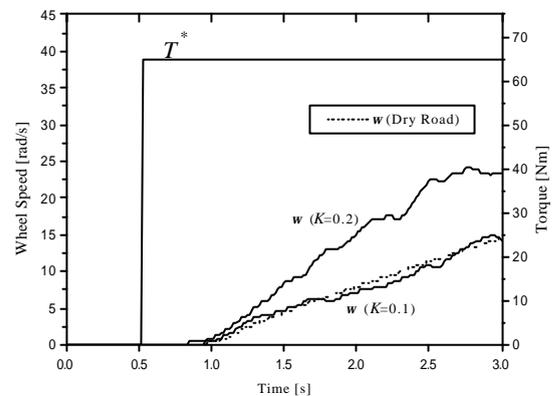


Fig.12 Effect of gain K.

る。一つは $K=0.2$ とした場合、もう一つは $K=0.1$ とした場合である。上述したように、本実験での安定限界は $K=0.11$ であったので、 $K=0.1$ とした場合は理想車輪速に追従するが、 $K=0.2$ として安定限界を外れると車輪速は不安定になり理想車輪速に追従しないのがわかる。これより本論文で述べた安定解析の妥当性が窺える。

なお、図中トルク指令から回転数を検出するまでに遅れが見られるが、これが本実験システム固有の遅れである。

5.3 ヨーモーメント安定化制御の実験と考察

この実験は直線を一定トルク 75Nm(両輪とも)で加速し、車両スピードメータが 25km/h となったとき、そのスピードを維持できるようにトルクを 25Nm とし、その

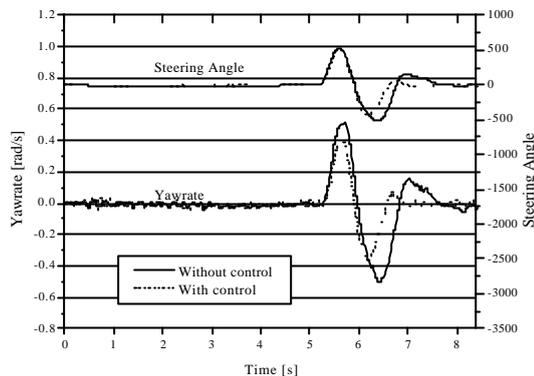


Fig.13 Experimental result of proposed method with dry road.

状態で実験者がハンドルにより外乱を入れ、外乱抑圧効果を確認したものである。* $\tau=0$ としているので、操舵により発生するモーメントは外乱として振舞うことになる。実験者がハンドル操作により入力するため、実験ごとに多少のばらつきはするが、舵角センサの出力がほぼ一致するようにハンドルを操作し同一の外乱が入力するようにした。実験時は $\tau=0.3s$, $\sigma=3s$, $Kp=200$, $Ki=5$, $K=0.1$ とし T_{ac}^* は上述のとおりに入力している。

Fig.13 と Fig.14 に実験結果を示す。どちらもグラフ上側の波形が舵角センサ出力で、下側の波形がヨーレートセンサの出力を示している。Fig.13 は乾燥したアスファルト路面上で実験を行ったものである。これより、提案法を用いることにより、ヨーレートが 33% 減少している。さらに、舵角入力が正弦波状になっているが、最初の半周期は外乱を入力するための操舵であり、後半の舵角入力は前半の操舵入力によって変わった進行方向を元の方向に戻すための修正操舵である。これより、本制御を適用することにより修正操舵の量が減少している。つまり少ない舵角の入力により外乱入力前に走っていた進行方向に復帰することができる。4.1 のシミュレーションと比較すると、外乱抑圧効果が小さく見えるが、この理由は実験機の出力できるトルク飽和にある。Fig.14 は雪路面での実験結果である。外乱としての操舵を行う前に、ヨーレート出力にノイズが乗っている。これは、加速時にわずかなスリップ現象を起こし横力が減少したため、挙動が不安定に発生した。この結果では 25% の外乱抑圧効果があった。また、11s 付近で制御なしの場合は不安定現象（スピン）が起こっているが、制御を適用すればこのような現象も回避できる。

6. 結論

本論文では、車輪速を制御するマイナーループ、外側のヨーモーメントループ共にオブザーバで構成し、小型 EV の車両姿勢制御を実現するシンプルな制御系を提案した。マイナーループであるアンチスリップオブザーバを用いた駆動力制御は、路面の変化を制御対象の変動と

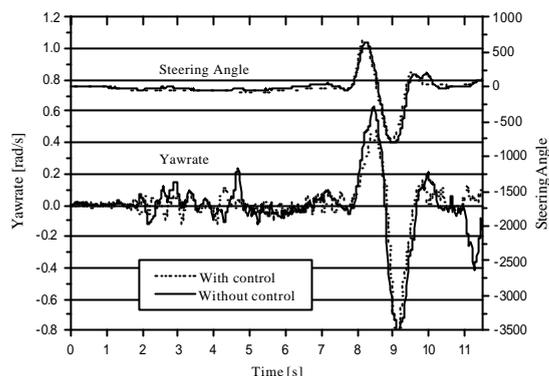


Fig.14 Experimental result of proposed method with snowy road.

捉え口バスタ安定性を解析することによりゲインの設定・チューニングに対する指針を与え、その有効性を実験により示した。また、測定や推定が困難である車両パラメータに依存しないヨーモーメントオブザーバを用いた制御系を提案し、シミュレーションと実験を行った。この結果、システムに 500ms 程度の大きなむだ時間がある場合でも外乱ヨーモーメントを最大 33% 減少させることができた。今後は実験車両で最も大きな問題である遅れ時間を解決し、更なる制御性能の向上を図る。

謝辞

本論文を作成するにあたり、実験場所を提供していただいた本学高橋研究室電気自動車研究室の齋藤助手と同研究室の皆様、回路作製や実験に協力していただいた本学野口研究室の加藤氏、裾坂氏に深謝いたします。

参考文献

- [1] 広瀬, 丹下: “電気自動車・ハイブリッド自動車の現状と将来”, 自動車技術, Vol.56, 1, (平14)
- [2] S. Sakai, H. Sado, and Y. Hori, Motion Control in Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors” IEEE Trans. On Mechatronics, Vol.4, No.1, 1999.
- [3] 永井, 王: “左右駆動力の配分制御による電気自動車の運動制御”, 電気学会論文誌, Vol.116-D, No.3, (平8)
- [4] 結城, 村上, 大西, “共振比制御による2 慣性共振系の振動抑制制御”, 電気学会論文誌, Vol.113-D, No.10, (平5)
- [5] 鶴岡, 豊田, 堀, “路面状態推定を用いた電気自動車のトラクションコントロール”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-97-22, (平9)
- [6] 安部正人: 「自動車の運動と制御」山海堂 (平4)
- [7] 藤本, 河村: “外乱オブザーバを併用したスライディングモード制御と二自由度制御の外乱抑圧に関する考察”, 電気学会論文誌, Vol.114-D, No.3, (平6)