

スリップ及びヨーモーメントオブザーバを用いた 電気自動車の操縦安定化制御法

齋藤 健生* 藤本 博志 野口 季彦 (長岡技術科学大学)

Traction and Steering Stabilization Control for Electric Vehicle
Based on Slip and Yaw-Moment Observers

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

Abstract

In this paper, novel direct yaw moment control and antislip control is proposed for the electrical vehicle. The proposed controller is composed of double disturbance observers. The inner-loop observer controls the vehicle traction, and 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. The experiments demonstrate the performance of these controllers in snowy condition, and the stability is analyzed by inertia variation and dead-time.

キーワード：アンチスリップオブザーバ，ヨーモーメントオブザーバ，電気自動車，操縦安定性
(anti-slip observer , yaw-moment observer , electric vehicle , steering stability)

1. はじめに

電気自動車 (Electric Vehicle:EV) の制動力及び駆動力制御や車両姿勢制御に関しては，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，内燃機関自動車 (Internal Combustion Engine Vehicle:ICEV) よりも高度な車両姿勢制御が行えるとされておりすでに多くの研究が行なわれている^{[1][2]}。さらに市販車においても後輪にモータを使用した四輪駆動ハイブリッド自動車 (Hybrid Vehicle:HV) の効用として，低 μ 路面でのコントロール性の向上を達成している^[3]。

一方，寒冷地では雪面や氷面での走行が多くなるため，走行中にスリップやスピンなどの危険が伴う。このため，これら^{[1][2][3]}の研究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。しかし，一般的にこれらの制御法や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。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，我々はこれまでに並進方向の制御を司るインナーリングと回転方向の制御を担うアウトerringの二重リング構造を有し，いずれの制御リングにも外乱オブザーバを応用した，車両すべり角，車両速度，コーナリングフォースの検出・測定・推定が不要である新しいEV車両姿勢制

御方法を提案した^[4]。雪面走行実験によって提案法の有効性を確認することができたが，既成のインバータに内在する300~500[ms]程度の大きなむだ時間のために性能の向上を図ることができなかった。

そこで，本論文では新システムを製作し既成のインバータに内在したむだ時間を除去すると共に制御周期を15[ms]から2[ms]に短縮し，制御性能の向上を図った。このシステムにより雪面での車輪速制御実験を行い，スリップ時の挙動をむだ時間を含む慣性変動と捉えることにより，安定性解析を行なった。この結果を，昨年のむだ時間を多く含むシステム^[4]と比較することにより制御周期の向上，むだ時間の短縮がもたらす車輪速制御の効果を明らかにした。また，新システムにより乾燥路面において2次元の車両制御実験を行ったので報告する。

2. アンチスリップオブザーバに基づく車輪速制御

2.1 並進運動方程式 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。

$$(J_{\omega} + Mr^2) \frac{d\omega}{dt} = T \dots\dots\dots (1)$$

ただし，それぞれのパラメータは J_{ω} ：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， ω ：駆動輪回転速度である。

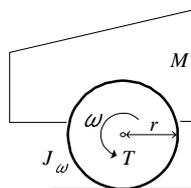


図1 車輪一輪モデル

Fig. 1. One-wheel vehicle model.

(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 車輪速制御とむだ時間の影響 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。Fig. 2 はプラント $P(s)$ と外乱オブザーバを表し、入力にはトルク電流指令 I^* 、外乱トルク T_{dis} 、センサノイズ n であり、出力は車輪回転速で ω となっている。 K_t はモータトルク定数を示す。著者らは論文^[4]で、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ることにより、

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

として解析を行った。 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 はプラントの実際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_ω またはそれに近い値になる。また Δ はプラントの変動でありこれまでは、

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

と考えていた。しかし、実際の実験システムである既成のインバータには乗り心地改善のためにトルク指令に対して大きなむだ時間を含んでいた。また、このようなフィルタが存在しないシステムにおいても、サンプリングに起因する遅れや、エンコーダの分解能に起因する速度検出の遅れ、さらにはモータがトルクを出してからタイヤの動特性を介して実際に駆動力が発生するまでも遅れが存在すると考えられる。このため、不確かさ Δ にむだ時間を考慮する必要がある。むだ時間を考慮すると(2)式は、

$$P(s) = \frac{1}{Js} e^{-sT_d} = \frac{1}{J_n s} \{1 + \Delta(s)\} \dots\dots\dots (4)$$

となり、これより Δ について再記述すると、

$$\Delta(s) = \frac{J_n}{J} e^{-sT_d} - 1 \dots\dots\dots (5)$$

と表される。よって、このむだ時間を含んだ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なりアンチスリッ

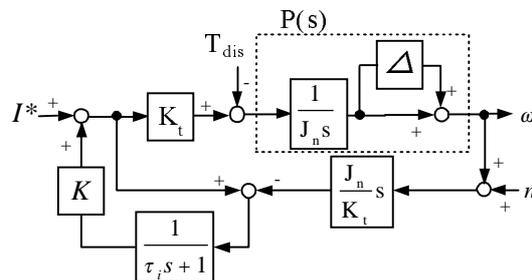


図2 アンチスリップ制御ブロック線図

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

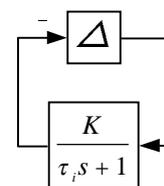


図3 図2の等価ブロック線図

Fig. 3. Equivalent block diagram of Fig. 2.

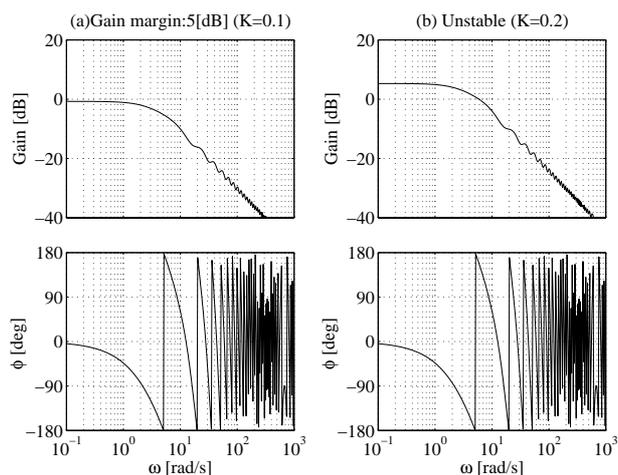


図4 $Q(s)\Delta(s)$ の周波数特性

Fig. 4. Frequency response of open loop transfer function.

プ制御を実現する。一方、安定解析をするため Fig. 2 を変形すると、Fig. 3 の等価ブロック線図が得られる。ブロック線図は不確かさ Δ とオブザーバのローパスフィルタ及びオブザーバゲイン K が組み合わされたフィルタ Q によって表される。これより、Fig. 3 におけるオープンループ伝達関数を求めると、

$$Q(s)\Delta(s) = \frac{K}{\tau_i s + 1} \cdot \left(\frac{J_n}{J} e^{-sT_d} - 1 \right) \dots\dots\dots (6)$$

となる。 T_d はむだ時間を表し、 τ_i はオブザーバの時定数である。この伝達関数についてむだ時間を 400[ms] とし、 $K=0.1$ の場合と $K=0.2$ の場合のボード線図を Fig. 4 に示す。(a) の $K=0.1$ の場合はゲイン余裕があり安定である

が、(b) の $K=0.2$ の場合はゲイン余裕がなく不安定系になっていることが確認できる。この解析により、遅いフィルタを含む著者らの従来のシステム^[4]で、 K を 0.1 以上に上げると系が不安定になった理由が明らかとなった。このことよりむだ時間を多く含み、位相が大きく回る系ではゲイン K を小さくしなければ、安定性を維持できないことがわかる。この解析結果は、ガソリン自動車や制御周期が遅い電気自動車など長いむだ時間 T_d を含む系ではオブザーバゲイン K を上げられないことを示すと共に、逆にむだ時間を除去すれば、ゲインを上げることによりスリップ抑圧特性を向上させることができるということを意味する。

3. ヨーモーメントオブザーバに基づく車輪速制御

3.1 車両運動方程式 車両モデルは Fig. 5 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。

$$MV \left(\frac{d\beta}{dt} + \gamma \right) = 2Y_f + 2Y_r \dots\dots\dots (7)$$

$$I \frac{d\gamma}{dt} = 2l_f Y_f - 2l_r Y_r \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 M は車両重量、 V は車両速度、 β は車両すべり角、 γ 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, β を測定するには車両の実速度ベクトルが必要となる。さらにコー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^[4]。

すなわち (8) 式の右辺で表されるタイヤに発生するモーメントを N_t 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、(8) 式は、

$$I \frac{d\gamma}{dt} = N_z + N_t - N_d \dots\dots\dots (9)$$

と簡単化される。(9) 式について、ヨーレートを検出し Fig. 6 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、

$$\gamma = \frac{1}{I_n s} N_{in} \dots\dots\dots (10)$$

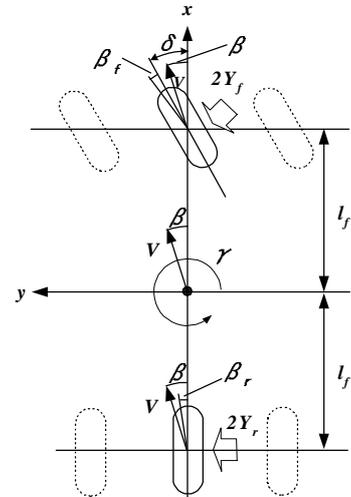


図5 等価二輪車モデル

Fig. 5. Equivalent two-wheel vehicle model.

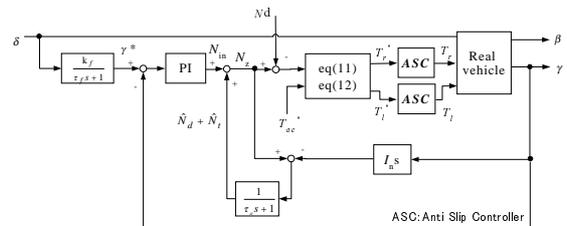


図6 車両安定制御ブロック線図

Fig. 6. Block diagram of vehicle stability control.

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。

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。

$$N_z = l_p (F_r^* - F_l^*) \dots\dots\dots (11)$$

$$T_{ac}^* = F_r^* + F_l^* \dots\dots\dots (12)$$

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。(11), (12) 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

$$T_r^* = r F_r, \quad T_l^* = r F_l \dots\dots\dots (13)$$

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 I の変動とみなせるので、本手法によりその変動の影響をロバストに抑圧することができる。

3.3 目標値応答特性 本システムにおいて、舵角 δ からヨーレート指令 γ^* に至る目標値応答特性を得るためには、Fig. 6 のブロック線図に示すようにフィードフォワードモデルとして、

$$G_{\gamma\delta}(s) = \frac{k_f}{\tau_f s + 1} \dots\dots\dots (14)$$

を採用し，実験で得られた値を参考に τ_f, K_f を設定すれば，目標ヨーレートである γ^* に良好に追従することをシミュレーションで確認している。

4. 実験システム構成とモータ電流制御

4.1 実験システム

著者らが文献(4)で実験を行ったシステムは，市販電気自動車に装備されていたインバータを使用していた。このため乗車フィーリングを向上させるためにトルク指令に対して 300[ms] 程度のローパスフィルタが挿入されており，この遅れ要素の影響が問題となっていた。

そこで本論文では Fig. 7 に示す新しいシステムを作り，むだ時間の影響をなくした。インバータは IGBT キャリア変調方式でキャリア周波数は 10[kHz] である。コントローラには RT-Linux を搭載したデスクトップパソコンを用い，PCIバス用 AD ボードで電流センサやヨーレートセンサなどのセンサ類の入力を行う。パソコンにより計算された各モータ指令値は PCI バス用 DA ボードから出力され変調回路を通してインバータに入力している。このように，一番マイナーなループである電流制御ループから，車輪速を制御するアンチスリップオブザーバ，一番外側のループであるヨーモーメントオブザーバに至る三重ループを構成しており，それらすべてを RT-Linux による一つの PC で制御を行う。制御周期は 100[μs] で PWM キャリアと同期させている。また，パソコンの電源はメインバッテリー 72[V] を昇圧チョッパにより 230[V] まで昇圧させパソコンに内蔵されている ATX 電源を駆動させている。

車輪速度検出についてはモータ電気角 60 °ごとに発生するエンコーダパルスを利用している。タイヤ回転でおよそ 225 パルスの分解能である。このエンコーダパルスの間隔を測定することにより速度を求めている。低分解能エンコーダであるため離散化の問題が発生するが，2[ms] の期間の移動平均を取ることで影響を低減している。

4.2 モータ電流制御 Fig. 8 にモータ相電流を示す。電流制御は 180 °通電方式を採用し，電流応答は 1[ms]~2[ms] である。車速が上昇するとインバータの電圧余裕が減少し指令電流と実電流の誤差が大きくなってしまふ。このため，車輪速が 10[rad/s] を超えると電流制御方法を 120 °通電に切替え，電流の 30 °位相進み制御を行っている。このとき，180 °通電方式に比べてトルクが減少しないよう，電流指令値を補正している。

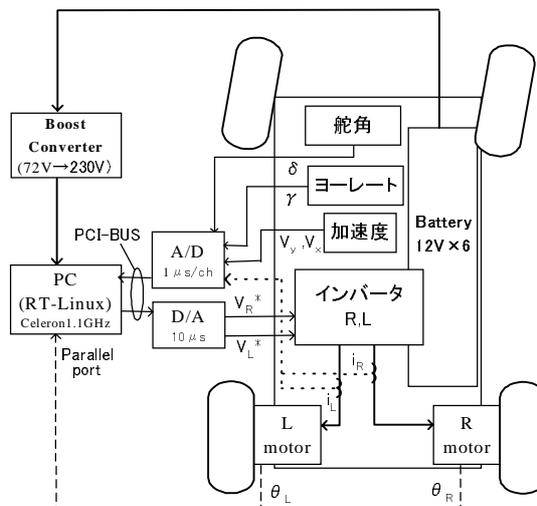


図 7 新実験システム

Fig. 7. Configuration of new experimental setup.

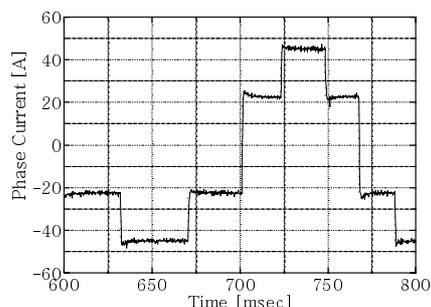


図 8 180 °通電方式モータ相電流

Fig. 8. Controlled motor phase current.

5. 実験結果

5.1 アンチスリップ制御の実験結果と考察

実験はシャーベット状の雪路面で行った。雪面を均すことにより実験環境が常に同じになるように注意した。電流指令(トルク指令)はステップ入力とし，振幅は 45[A] とした。新システムはモータトルク定数がわからないため電流で指令値を与える。このため J_n についてはモータトルク定数 K_t を考え J_n/K_t として同定を行った。同定結果は $J_n/K_t=7[\text{Nms}^2/\text{A}]$ である。

Fig. 9~Fig. 13 は実験結果と安定解析の結果を示す。Fig. 9, Fig. 10 はオブザーバのカットオフや，ゲイン K を変化させたときのそれぞれの車輪速度を示す。時刻 4000[ms] においてステップ電流指令を入力しているが，Fig. 9 はカットオフを 30[rad/s] に固定し，オブザーバゲイン K を 0.0~1.0 まで変えた時の車輪速度を示す。非制御時は大空転が発生し，車輪速が大きく跳ね上がっているが，本制御を適用することにより，非制御時に比べて良好な車輪速度の応答を確認できる。また，ゲイン K を上げることによ

り車輪速度の制御性が向上している。これはむだ時間を排除すれば、 K を上げられるという第2章の理論解析の結果と一致する。しかし、ゲインを $K=1.0$ まで上げると車輪速度は振動的となっている。

これについて第2章の安定性解析を行った結果を Fig. 11 に示す。カットオフは $30[\text{rad/s}]$ ($\tau_i=0.033[\text{s}]$) とし、イナーシャは乾燥路面と無負荷時の同定値から $J_n=10.5[\text{Nms}^2]$, $J=1.0[\text{Nms}^2]$ と設定した。むだ時間は、車輪速度の検出周期 ($2[\text{ms}]$) とトルク指令を出力してから実際に駆動力が発生するまでの遅れも考慮に入れ、 $T_d = 5[\text{ms}]$ と仮定する。Fig. 11 より、 $K=0.8$ ではゲイン余裕は小さいが安定となっているのに対し、 $K=1.0$ では不安定となっていることから、実験で得た K の限界値 0.8 に一致する。

Fig. 10 はオブザーバゲインを $K=0.8$ で固定し、カットオフ ω を $3[\text{rad/s}]$, $30[\text{rad/s}]$, $40[\text{rad/s}]$ と変化させ場合の実験結果である。カットオフを $3[\text{rad/s}]$ のように低くすると、安定解析を行ったむだ時間の影響を大きく受け制御が不安定となっている。一方、 $30[\text{rad/s}]$, $40[\text{rad/s}]$ では良好な制御特性が得られる。

Fig. 12~Fig. 13 に示す実験結果は、加速度センサの信号を $100[\mu\text{s}]$ でデジタル積分した車体速度を示す。Fig. 12 は ω を $30[\text{rad/s}]$ に固定し、 $K=0.0, 0.1, 0.7$ と変えた場合の速度勾配を示す。 $K=0.7$ のグラフが時刻 $4000[\text{ms}]$ で電流指令を与え、初速は $0[\text{m/s}]$ であるにもかかわらず、センサ検出値にオフセットが載っている。これは始動時の大電流により発生したインバータのスイッチングノイズが重畳したためである。しかしノイズはデジタル積分することにより平均化され、速度の勾配自体には問題がない。 $K=0.7$ では Fig. 9 で示したように、車輪速が良好に制御されているため、路面との摩擦が維持され一定加速度で速度が上昇していることがわかる。一方 K を下げていくと、Fig. 9 でもわかるように車輪回転数速度があがり、スリップが発生することにより摩擦が減少し速度も減少していることがわかる。

Fig. 13 は $K=0.7$, $\omega=30[\text{rad/s}]$ 時の実験結果である。上側の線は加速度センサをデジタル積分した車体速度を表し、下側は車輪速度を車体速度に変換したものである。加速度センサにオフセットが乗っているのは、先ほどと同じようにインバータノイズの影響である。勾配だけを比較すると、車輪速度とセンサ値の示す車体速度が同じ勾配で増加している。これより、 $K=0.7$, $\omega=30[\text{rad/s}]$ という条件でスリップが発生せず、タイヤと路面の間の摩擦力を維持しながら加速していることを示している。

5.2 ヨーモーメントオブザーバの実験結果と問題点
この実験は乾燥路面において $20[\text{km/h}]$ で走行し実験者が操舵によって外乱を入れ、制御系の外乱ヨーモー

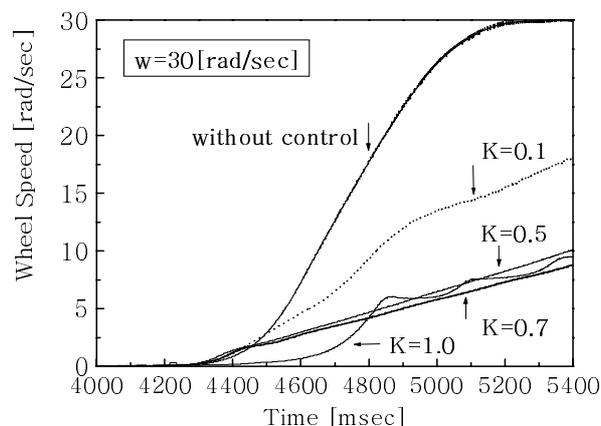


図9 オブザーバゲイン K による比較

Fig. 9. Experimental results of anti-slip control.

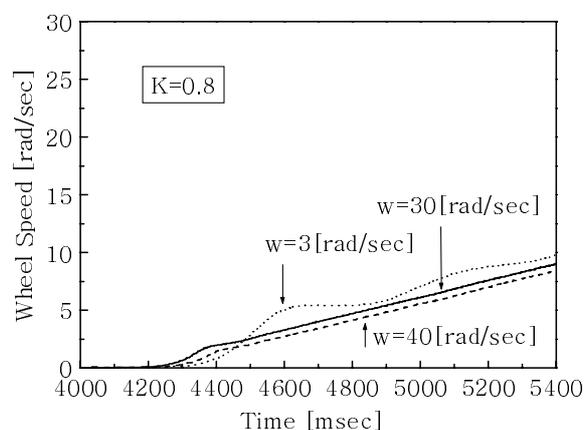


図10 オブザーバカットオフによる比較

Fig. 10. Improvement by cut-off frequency.

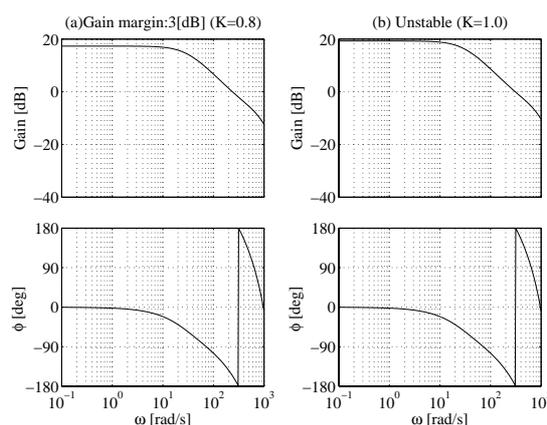


図11 安定性解析

Fig. 11. Stability analysis.

ントに対する抑圧効果を確認したものである。ヨーモーメントオブザーバのカットオフは $0.3[\text{rad/s}]$ とし、 $\gamma^* = 0$ としている。Fig. 14 に示すように、非制御時に比べてヨーレート外乱応答を向上させることができていることが分か

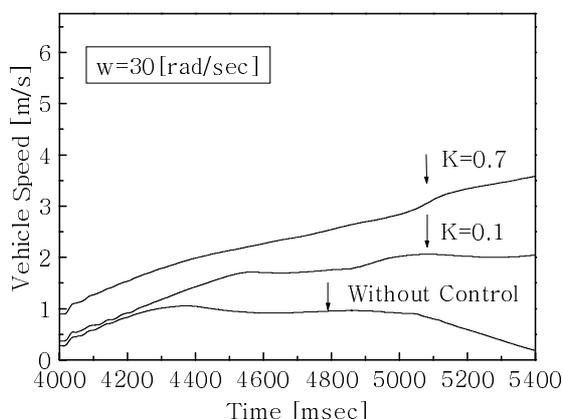


図 12 加速度センサによる比較

Fig. 12. Accelerometer output.

る。本研究で製作したシステムでは、インバータから発生するノイズのためにセンサが影響を受けてしまうためヨーモーメントオブザーバのカットオフを上げることができなかった。しかしながら、本装置ではむだ時間を排除したことから、ノイズの問題さえ解決できれば、ヨーモーメントオブザーバのカットオフを $3.0[\text{rad/s}]$ 程度には上げることができると期待できるので、今後の課題としたい。

6. 結 論

本論文では、車輪速制御、ヨーモーメント制御ともにオブザーバで構成する EV の車両姿勢制御^[4]について、むだ時間を排除した新しいシステムにより実験を行った。マイナーループにアンチスリップオブザーバを用いた駆動力制御では、むだ時間のある系の安定解析を行うことで、むだ時間が制御に与える影響を明確にし、オブザーバのゲインの理論的最大値を導出した。また安定性解析の有効性を雪面実験における結果と比較し、解析の有効性を確認した。また、アンチスリップオブザーバの実験結果より、インナーループシステムのサンプリングを $15[\text{ms}]$ から $2[\text{ms}]$ まで上げることによって、オブザーバのカットオフを上げることが車輪速制御の向上につながることを示した。

これにより、ガソリン車のようなむだ時間の多いシステムに対する電気自動車の有効性を、雪上での運動安定性という観点から、理論的及び実験的に証明することができた。一方、ヨーモーメント制御システムについてはインバータより放射される強力なノイズのために、ヨーモーメントオブザーバのカットオフを上げることができず、旧システムより良い結果を出すことはできなかった。しかし、ノイズ問題を解決すれば、インナーループの結果が示すように、むだ時間を除去した効果により制御性能は向上するものと考えている。今後はインバータシステムの再検討を行い、2次元制御での制御性能向上を図る。

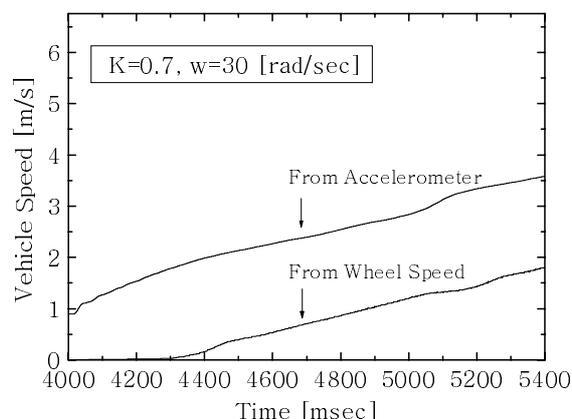


図 13 車輪速と加速度センサによる車体速度の比較

Fig. 13. Wheel speed and accelerometer output.

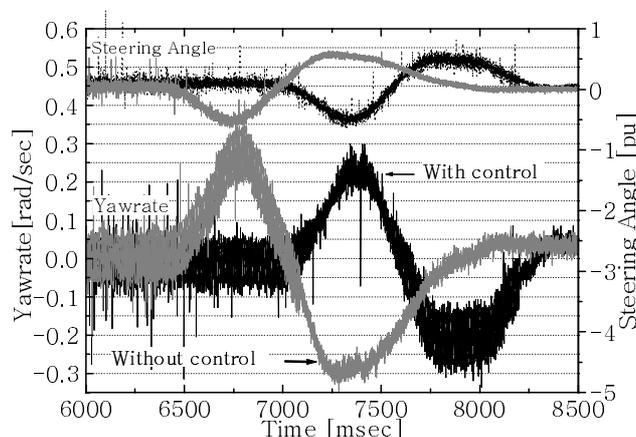


図 14 ヨーモーメントオブザーバ実験結果

Fig. 14. Experiment of Yaw-moment observer.

謝辞

本論文を作成するにあたり、実験に協力していただいた本学高橋研究室の齋藤助手と同研究室の増田氏、本学野口研究室の尾中氏に深謝いたします。

参考文献

- [1] Y. Tsuruoka, Y. Toyoda, and Y. Hori: "Traction Control of Electric Vehicle using Road Condition Estimation", *Proc. IMC*, IIC-97-22, 85-90 (1997) (in Japanese)
鶴田・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, 85-90, (平 9)
- [2] M. Shino, Y. Wang, and M. Nagai: "Motion Control of Electric Vehicles Considering Vehicle Stability", *Proc. AVEC 2000*, (2000)
- [3] T. Matuda, K. Shimizu, T. Akiba, H. Kosaka, K. Taniai, S. Ikeda: "Development of Electric-motor 4WD system", *JSAE of Japan*, vol.57, No.2, 95-100 (2003) (in Japanese)
松田・清水・榎場・小阪・谷合・池田:「モータ式4輪駆動システムの開発」, 自動車技術, Vol.57, 2, 95-100 (平 15)
- [4] T. Saitou, H. Fujimoto, and T. Noguchi: "Yaw-Moment Stabilization Control of Small Electric Vehicle", *Proc. IMC*, 83-88 (2002) (in Japanese)
齋藤・藤本・野口:「小型電気自動車のヨーモーメント安定化制御法」, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-02-53, 83-88 (平 14)