

コーナリングステイフネス推定値を用いた 電気自動車の走行安定化制御

裙坂昭生* (長岡技術科学大学) 藤本博志 (横浜国立大学) 野口季彦 (長岡技術科学大学)

Running Stabilization Control of Electric Vehicle Based on Cornering Stiffness Estimation

Akio Tsumasaka (Nagaoka University of Technology), Hiroshi Fujimoto (Yokohama National University),
and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

In this paper, novel direct yaw-moment control (DYC) is proposed for the electric vehicle with road condition estimation. An immeasurable parameter known as cornering stiffness is estimated from yaw-rate sensor, steering angle, wheel speed, and yaw-moment observer output in real time. Thus, the accurate control input can be generated by the estimated parameter. The proposed adaptive control is compared with the conventional robust control on the dry asphalt road. The experimental results show that the undesired yaw-rate is attenuated 19.2 % by the proposed control algorithm.

キーワード : コーナリングステイフネス, 走行安定化制御, 電気自動車, 駆動力制御, ヨーモーメント

Keywords : Cornering stiffness, running stabilization control, electric vehicle, traction control, yaw-moment

1. はじめに

電気自動車 (Electric Vehicle : EV) は, 内燃機関の排気による地球温暖化問題や化石燃料の枯渇問題などに対して非常に優れた点を有しているため, 内燃機関自動車 (Internal Combustion Engine Vehicle : ICEV) に代わって今後普及すると期待されている。しかし, 排気規制が厳しく定められることにより, 電子制御技術が進化して内燃機関の環境負荷も年々低減されている。また, ハイブリッド自動車 (Hybrid Vehicle : HV) の開発によって燃費性能も更に良くなり, 水を燃料とする燃料電池車 (Fuel-Cell Hybrid Vehicle : FCHV) までも登場した。このような背景から, EV は ICEV に代わるものにはなり得ず, 空港や公園内で限定的な使用に適したものと位置づけられている⁽¹⁾。しかし, EV はモータで純電氣的に駆動することから, モータ駆動の優位性である分散配置可能なことや高速なトルク応答を活かした高度な駆動力制御や走行安定化制御が期待できる⁽²⁾。

筆者らはヨーモーメントオブザーバを用いた走行安定化制御法を提案し, 測定や推定が困難な車両パラメータには依存せずロバスト制御するシンプルなアルゴリズムを構築した⁽³⁾。また, ヨーモーメントオブザーバを応用したコーナリングステイフネス推定法も提案し, オフライン実験によりその妥当性を検証してきた⁽⁴⁾。推定困難な未知パラメータであるコーナリングステイフネスを本手法により推定し,

車両モデルを用いてヨーモーメントを制御すれば, より正確で高速な制御が可能となる⁽⁵⁾。

本論文では後二輪にインホイールモータをもつ小型 EV を用いて, 提案法とヨーモーメントオブザーバを用いた従来法を比較検討し, 乾燥路面において二次元の走行安定化制御実験を行った。その結果, 提案する制御法の有効性を検証できたので報告する。

2. ヨーモーメントオブザーバを用いた走行安定化制御

(2-1) 車両運動方程式 車両モデルとして Fig. 1 に示したように四輪を車輪に関して対称と仮定した二輪車モデルを想定し, 車体のローリングを無視し, 一定速度で走行していると仮定する。この車両モデルの水平面内における運動方程式は次式で表される。

$$mV \left(\frac{d\beta}{dt} + \gamma \right) = 2Y_f + 2Y_r, \dots \dots \dots (1)$$

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

ただし, m は車両重量 (kg), V は車両速度 (m/s), β はすべり角 (rad), γ はヨーレート (rad/s), I はヨー軸回りの車両慣性 (kgm^2), 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 (m) である。 Y_f , Y_r は前輪, 後輪のコーナリングフォース (N) 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。

(2.2) ヨーモーメントオブザーバによる走行安定化制御法 上記の β などを測定するには車両の実速度ベクトルが必要となる。また、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や推定は困難である。そこで、これらのパラメータによる影響を外乱モーメントと捉え、外乱オブザーバによる一括補償法を考える。

(2)右辺で表されるタイヤに発生するコーナリングフォースによるモーメントを N_i とし、(2)右辺で考慮されていない路面状況の変化、横風などによる外乱モーメントを N_d 、実験機に装着されている二つのインホイールモータの駆動力差により生成することができるヨー軸回りのモーメントを N_z とし、 $N_d = N_d - N_i$ とおくと、(2)は、

$$I \frac{d\gamma}{dt} = N_z - N_d \dots\dots\dots (3)$$

と簡化される。(3)において、ヨーレートを検出し、Fig. 2 に示されるヨーモーメントオブザーバを構成すれば外乱モーメントは抑圧され、

$$\gamma = \frac{1}{I_s} N_m \dots\dots\dots (4)$$

とノミナル化することができる。ただし、マイナーなアンチスリップ制御系⁽³⁾により車輪は完全粘着を保ち、任意の駆動力モーメントを発生できるものと仮定する。

本システムでは生成した駆動力モーメント N_z を以下の方法で左右の車輪の駆動力として分配する。

$$N_z = I_p (F_r^* - F_l^*) \dots\dots\dots (5)$$

$$T_{ac}^* = F_r^* + F_l^* \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 F_r^* : 右輪駆動力指令 (N), F_l^* : 左輪駆動力指令 (N), T_{ac}^* : アクセル指令 (N)である。(5), (6)を解くことにより、左右それぞれの車輪駆動力を決定することができる。さらに、

$$T_r^* = rF_r^*, T_l^* = rF_l^* \dots\dots\dots (7)$$

として、各車輪駆動モータに対するトルク指令を決定する。 r は車輪半径 (m)である。また、 l_p は各モータから車軸中心までの距離 (m)である。

本システムにおいて、ヨーレート指令 $\dot{\gamma}^*$ を生成するためには、Fig. 2 のブロック線図に示すような舵角 δ から $\dot{\gamma}^*$ に至る一次遅れの伝達要素をフィードフォワードモデルとして設けている。

$$G_{fd}(s) = \frac{k_f}{\tau_f s + 1} \dots\dots\dots (8)$$

(8)で必要となるパラメータ τ_f, k_f は実験で得られた値を参

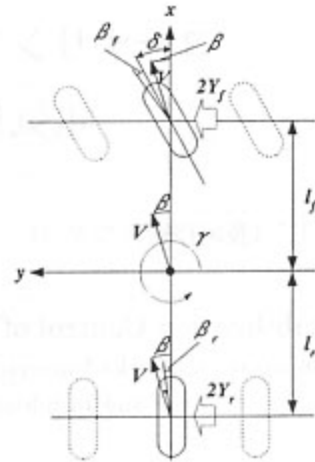


図1 等価二輪車モデル

Fig. 1. Equivalent two-wheel vehicle model.

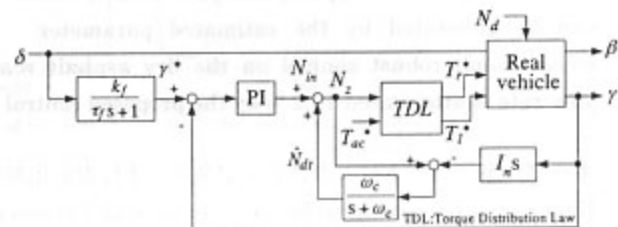


図2 ヨーモーメントオブザーバを用いた走行安定化制御ブロック線図

Fig. 2. Block diagram of vehicle stability control based on yaw-moment observer.

考にしている。

3. コーナリングスティフネス推定値を用いた走行安定化制御

(3.1) コーナリングスティフネス推定アルゴリズム

(2)において、前輪、後輪のコーナリングフォース Y_f, Y_r は次のように表される。

$$Y_f = -C_f \left(\beta + \frac{l_f}{V} \dot{\gamma} - \delta \right), Y_r = -C_r \left(\beta - \frac{l_r}{V} \dot{\gamma} \right) \dots\dots (9)$$

C_f, C_r は前輪、後輪のコーナリングスティフネス (N/rad)である。(2)において、モデルを簡化するため重心から前輪軸、後輪軸までの距離を $l_f = l_r = l$ 、前輪、後輪のコーナリングスティフネスを $C_f = C_r = C$ とすれば、(3)から、

$$I \frac{d\gamma}{dt} = N_z + C \left(-\frac{4l^2}{V} \dot{\gamma} + 2l\delta \right) - N_d \dots\dots\dots (10)$$

となる。(10)の括弧内をとすれば、Fig. 2の外乱オブザーバ出力から、

$$\hat{N}_d = -C\zeta + e \quad (11)$$

と表すことができる。 $e = N_d - \hat{N}_d$ が十分小さいかホワイトであれば最小二乗法によりコーナリングステイフネス C の推定が可能となる。ただし、 \hat{N}_d はオブザーバの推定誤差 $N_d - \hat{N}_d$ である。(10), (11)からわかるように検出が困難な β に依存せず、ヨーモーメントオブザーバ出力と直接検出できるパラメータ δ, γ, V から容易に C を推定できる。

コーナリングステイフネスの推定には重みつき逐次形最小二乗法を採用し、その推定式を(12)に、適応ゲインの更新式を(13)に示す。また、 λ は忘却係数であり、discontinuous projection と条件付きアップデートアルゴリズムにより推定値を有界としている⁽⁶⁾。

$$\hat{C}(k) = \hat{C}(k-1) - \text{Proj}_c \frac{\Gamma(k-1)\zeta(k)}{\lambda + \zeta^T(k)\Gamma(k-1)} [\zeta(k)\hat{C}(k-1) - \hat{N}_d(k)] \quad (12)$$

$$\Gamma(k) = \Gamma(k-1) - \frac{\Gamma^2(k-1)\zeta^T(k)}{\lambda + \zeta^T(k)\Gamma(k-1)} \quad (13)$$

(3-2) 提案法による走行安定化制御 推定した \hat{C} と測定可能なパラメータからなる ζ から、タイヤに発生するコーナリングフォースによるモーメント推定値は、

$$\hat{N}_c = \hat{C}\zeta \quad (14)$$

となるため、すべて既知の値から推定することができる。

(3)について、ヨーレートを検出し、Fig. 3に示すシステムを構成すれば、推定値 \hat{C} により生成された \hat{N}_c により系がノミナル化され、

$$\gamma = \frac{1}{I_{As}} N_{in} \quad (15)$$

となる。ただし、上式において $N_d = 0$ としている。また、マイナーなアンチスリップ制御系⁽³⁾により車輪は完全粘着を保ち、任意の駆動力モーメントを発生できるものと仮定する。駆動力の分配やヨーレートの指令値の生成法については、ヨーモーメントオブザーバを用いた走行安定化制御と同様である。

4. シミュレーションによる検証

(4-1) 提案法による外乱抑圧特性 Fig. 3のように構成されたシステムにおいて、入力外乱なしと外乱ありの場合のシミュレーションを行った。シミュレーション条件は、 $m = 400$ (kg), $V = 20$ (km/h), $I = 160$ (kgm²), $l_f = 0.689$ (m), $l_r = 0.591$ (m), $l = (l_f + l_r)/2 = 0.64$ (m), $C_f = C_r = 10000$ (N/rad) とし舵角 δ は、0.2 (rad)のステップ入力とした。推定では \hat{N}_d に閾値を設け、推定に有効な信号が来なくなると推定値を更新せず、出力を保持するようにしている。外乱オブザーバのカットオフ ω_c は実際の実験システムを想定して

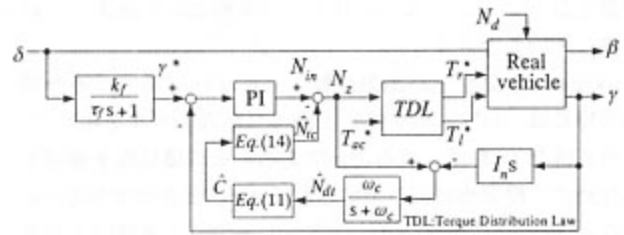


図3 コーナリングステイフネス推定値を用いた走行安定制御ブロック線図

Fig. 3. Block diagram of vehicle stability control based on cornering stiffness estimation.

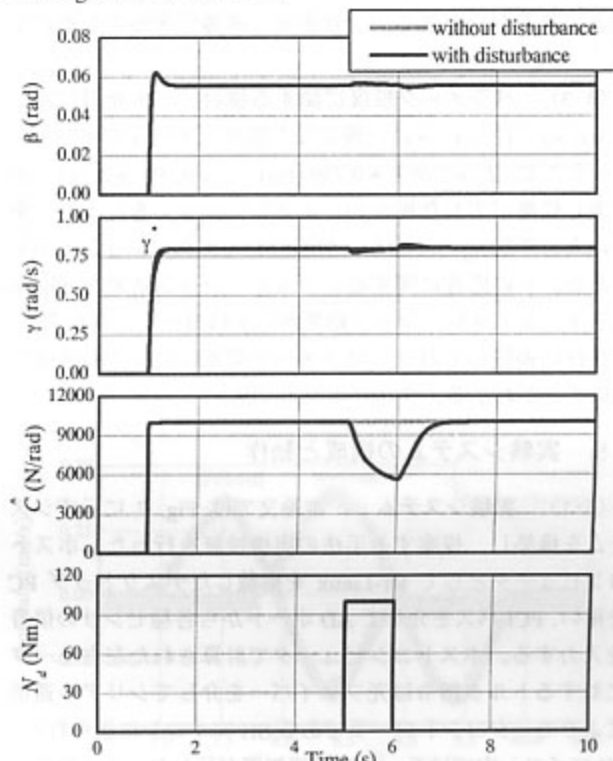


図4 提案法によるシミュレーション結果

Fig. 4. Simulation results of proposed method.

$\omega_c = 5.0$ (rad/s)と設定した。また、ヨーレートの制御入力である N_c には実験を想定してリミッタを設けている。シミュレーションはP制御のみで行っている。

Fig. 3において、舵角 δ からヨーレート指令 γ^* までのフィードフォワードモデルは、実験的に得られた値を参考に、 $\tau_f = 0.05$ (s), $k_f = 4$ (s⁻¹)と設定した。入力外乱なしとありの場合について γ と β の応答特性を Fig. 4に示す。いずれの場合も外乱を効果的に抑圧することができ、 γ はヨーレート指令 γ^* と一致し β も小さく抑えることができる。また、コーナリングステイフネス推定値が外乱により変動しているが、これは路面状況の変化による外乱と区別できないからである。したがって、本制御法ではあらゆる外乱による

影響をコーナリングスティフネスの変動として捉え、一括補償していると言える。

(4.2) オブザーバ出力比較 従来法に対する本制御法の特長は、パラメータ推定と簡素な車両モデルを用いて、より正確な N_y を得られることである。その優位性を確認するために、提案法により推定される \hat{N}_y と従来法である Fig. 1 の \hat{N}_y との比較を行った。シミュレーション条件は入力外乱 N_d なしで前述と同様である。入力外乱がないので Fig. 1 の \hat{N}_y は N_y を推定していることになる。Fig. 5 に真値 N_y と \hat{N}_y , \hat{N}_ϕ , 真値との誤差を示す。本制御法を用いることによりヨーモーメントオブザーバによる一括補償法に比べ真値との誤差が殆ど無く、より忠実に補償できることがわかる。

(4.3) パラメータ感度に関する検討 本制御法は、 $I_f = I_f = I$, $C_f = C_f = C$ と仮定した単純化モデルを用いている。そこで、 $I_f = 0.689 \rightarrow 0.739$ (m), $I_r = 0.591 \rightarrow 0.541$ (m) と重心位置がずれた場合のシミュレーションを行った。条件は入力外乱 N_d なしとし、前述のシミュレーションと同じである。 γ の応答に関するシミュレーション結果を Fig. 6 に示す。シミュレーション結果から γ はヨーレート指令 γ^* に良好に追従しており、パラメータ誤差に対しても感度が低いことがわかる。

5. 実験システムの構成と動作

(5.1) 実験システム 本論文では Fig. 7 に示すシステムを構築し、提案する手法の実機検証を行った。ホストコンピュータとして RT-Linux を搭載したデスクトップ PC を使い、PCI バスを介して AD ボードから各種センサの信号を入力する。ホストコンピュータで計算された左右モータに対するトルク指令は光ファイバーを介してシリアル通信によりモータコントローラである SH マイコンに送られる。SH マイコン内ではモータの電流制御が行われ、その電圧指令に基づいて生成されたパルス幅変調 (PWM) 信号がインバータに入力される。インバータは 6 in 1 の IGBT から構成され、10 (kHz) のキャリアでスイッチングされている。このようにモータコントローラをホストコンピュータと光絶縁することにより放射ノイズの影響を受けにくくしている。各コントローラの通信は全二重調歩同期式であり、16bit データを上位 8bit と下位 8bit に分割して送受信している。また、通信速度は 38400 (bps)、ホストコンピュータとモータコントローラの制御周期は 100 (μ s) としている。ホストコンピュータの ATX 電源は EV のメインバッテリー 72 (V) を昇圧チョッパにより 230 (V) まで昇圧して確保する。

車輪速検出についてはモータの電気角 60° ごとに発生するエンコーダパルスを利用し、SH マイコンでこのパルス間隔を計測して計測値をホストコンピュータに送信すること

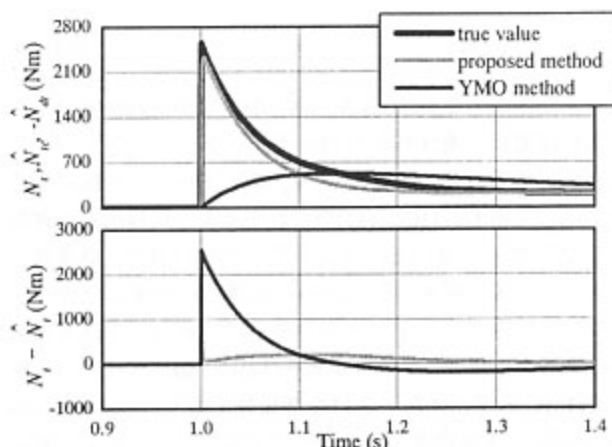


図5 オブザーバ出力による比較

Fig. 5. Comparison between yaw-moment observer based and cornering stiffness estimation method.

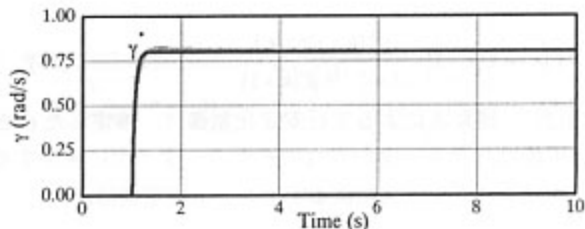


図6 パラメータ誤差がある場合の γ 目標値応答

Fig. 6. Simulation result under parameter error condition.

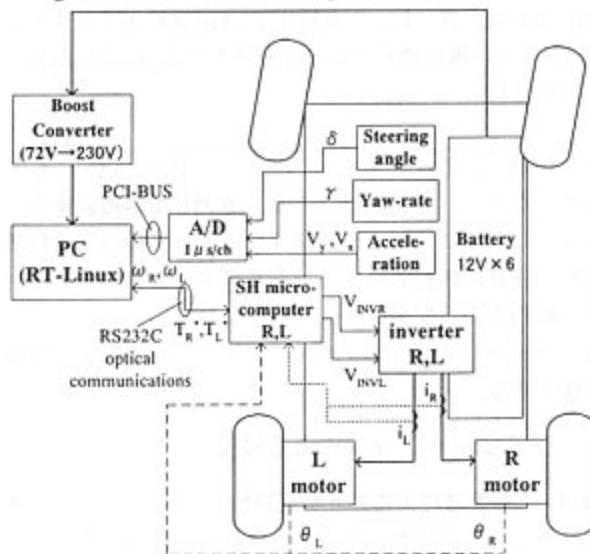


図7 実験システムの構成

Fig. 7. Configuration of experimental setup.

により車輪速を求める。

(5.2) モータ電流制御 Fig. 8, Fig. 9 にモータ相電流波形を示す。モータの電流制御は左右独立に 2 個の SH マイコンで行っており、ホストコンピュータからのトルク指令に応じて電流制御を行う。始動時はエンコーダ情報を用い

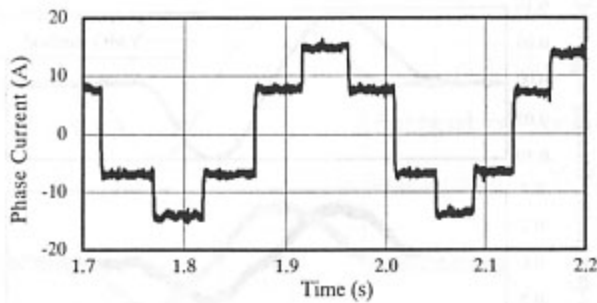


図8 6ステップ通電方式モータ相電流

Fig. 8. Six-step motor phase current.

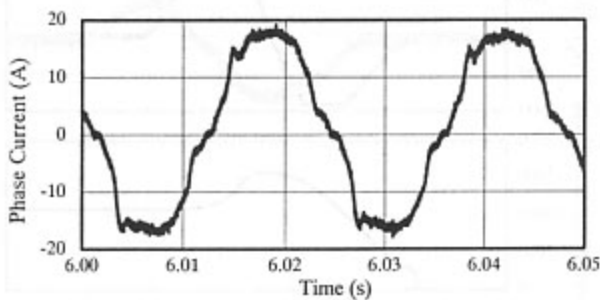


図9 ベクトル制御方式モータ相電流

Fig. 9. Vector-controlled motor phase current.

ることが難しいので6ステップ通電方式としているが、基本波周波数が30(Hz)を超えるとエンコーダ情報を用いてベクトル制御方式に切り換えている。ベクトル制御駆動時の連続した位相はエンコーダのパルス間隔を外挿することにより計算している。また、基本波周波数が35(Hz)を超えると弱め界磁制御を行う⁽⁷⁾。これらの実験結果より、両制御方式とも良好に電流制御されていることが確認できる。

6. 車両制御の実験結果

(6・1) コーナリングスティフネスのオンライン推定実験 実験はアスファルトの乾燥路面と濡れた路面で行い、20(km/h)で走行中に舵角 δ を正弦波状に入力している。このとき、ヨーレートの制御系を動作させていないので、制御入力 N_z は0とした。ヨーモーメントオブザーバのカットオフは3.0(rad/s)とし、車両慣性のノミナル値 I_n は160(kgm²)としている。推定には逐次形最小二乗法を採用しており、(11)の出力である \hat{N}_d に閾値を設け推定に有効な信号が来なくなると、推定値を更新せずそれまでの値を保持するようにしている。また、 ξ の生成にも \hat{N}_d と同じローパスフィルタを採用している。Fig. 10に本実験結果を示す。この結果から、ほぼ同じ舵角を与えているにもかかわらず、乾燥路面では9200(N/rad)、濡れた路面では8300(N/rad)という異なった推定値が得られた。これより、濡れた路面ではコーナリングスティフネスが小さくなり、すべりやすくなる

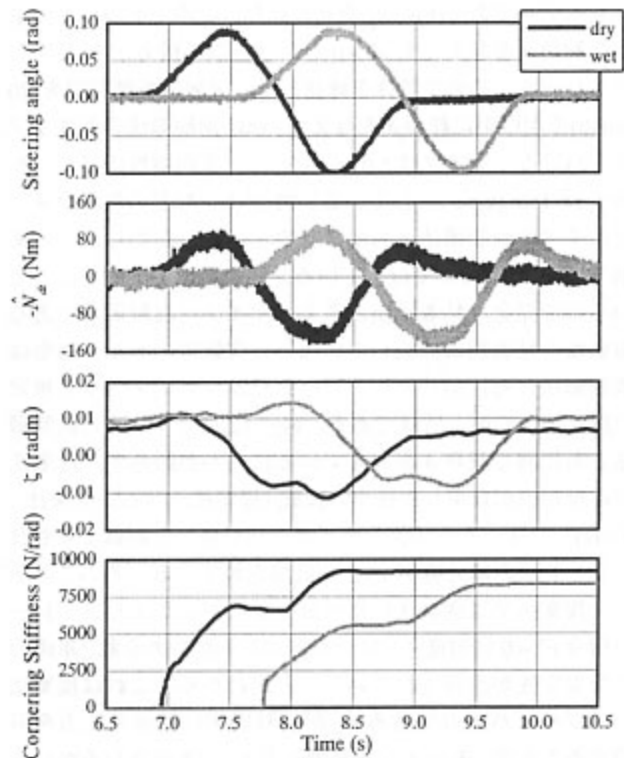


図10 推定実験結果

Fig. 10. Estimation results of experiment.

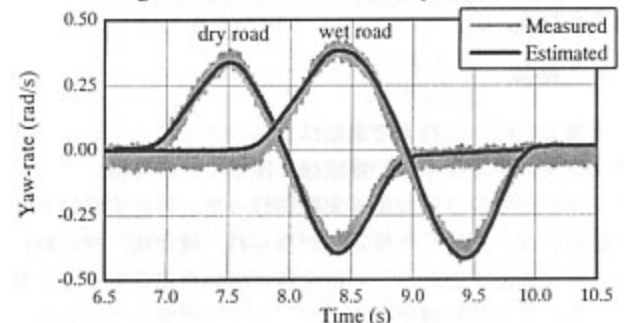


図11 オフラインでのヨーレート再現計算結果

Fig. 11. Offline calculation results of yaw-rate.

ことが数値的に立証できた。

(6・2) オフラインでのヨーレート再現計算 上記実験で得られた推定値の妥当性を確認するために、実験で測定したヨーレート γ が推定値から再現できるか検証した。検証方法としては、測定データの系列 δ 、 V と前節で得られた推定値 \hat{C} を(10)に代入し計算機を用いて γ をオフライン計算し、実際に測定された γ との比較を行った。Fig. 11に乾燥路面、濡れた路面での両再現計算結果を示す。路面状況に関係なく良好に γ が再現できており路面状況を反映した推定値の妥当性を確認できる。

(6・3) 走行安定化制御実験 制御系の評価をするために、舵角 δ からヨーレート指令 γ^* までのフィードフォワード

ードモデルである(8)の k_f を0とした。このことからどのような舵角 δ を与えても $\dot{\gamma}^* = 0$ となり、この指令 $\dot{\gamma}^*$ に対するヨーレート $\dot{\gamma}$ の追従特性を確認した。実験は乾燥路面を20 (km/h)で走行中に舵角 δ を与えている。両制御法の外乱オブザーバのカットオフは5.0 (rad/s)とし、車両慣性のノミナル値 I_n は160 (kgm²)としている。PIゲインなどの各パラメータはすべて両制御法とも同じ設定とした。ただし、この実験ではP制御のみで行っている。乾燥路面で実験を行っているので完全な粘着状態と考え、マイナーな制御系である駆動輪の粘着制御は施していない。実験でのトルク指令は両制御法ともに同じとし、コーナリングスティフネス推定に関しては前節と同様である。Fig. 12に示すように両制御法ともに同じ舵角 δ を与えているにもかかわらず、提案法では推定値が収束した後半の操舵(提案法:7.6 (s), 従来法:8.0 (s))でヨーモーメントオブザーバを用いた制御よりもヨーレート $\dot{\gamma}$ の最大値が19.2%低減されている。そのことから、提案法では従来法に比べヨーレート $\dot{\gamma}$ がよりヨーレート指令 $\dot{\gamma}^* = 0$ に追従し、ヨーモーメントが抑えられ、車両の走行安定性が改善されていることがわかる。これは提案法のオブザーバ出力である \hat{N}_c がより忠実に路面発生力を再現することで、モーメント制御入力 N_c が生成されるからと考えられる。また、コーナリングスティフネス推定値 \hat{C} は10800 (N/rad)という値が得られ、これも妥当な結果であると考えられる。

7. 結論

本論文では、これまで未知パラメータと考えていたコーナリングスティフネスの推定法に関して、計算機シミュレーション、オンライン推定実験を行った。推定実験結果から路面状況を反映した推定値が得られ、推定法、推定値の妥当性が確認できた。この推定値を用いた車両モデルに基づく走行安定化制御法に関して、すでに提案しているヨーモーメントオブザーバを用いた走行安定化制御法と計算機シミュレーション、乾燥路面実験を行い、比較することで提案法の有効性を示した。その結果、提案法を用いることで従来の制御法に比べてヨーレートを19.2%低減させることができた。今後は、インナーループにすでに提案している駆動輪の粘着制御⁽³⁾を施し、低 μ 路(特に雪面)での実験を行う所存である。

文 献

- (1) GP企画センター:「最新エンジン・ハイブリッド・燃料電池の動向」, グランプリ出版 (2003)
- (2) Y. Hori "Research on Future Vehicle driven by Electricity and Control", *FED Review*, vol.3, No.4 (2004-2)
- (3) T. Saito, H. Fujimoto, and T. Noguchi: "Traction and Steering Stabilization Control for Electric Vehicle Based on Slip and Yaw-Moment Observers", *Proc. IEE of Japan, Technical Meeting Record, IIC-03-53*, pp.41-46 (2003-3) (in Japanese)

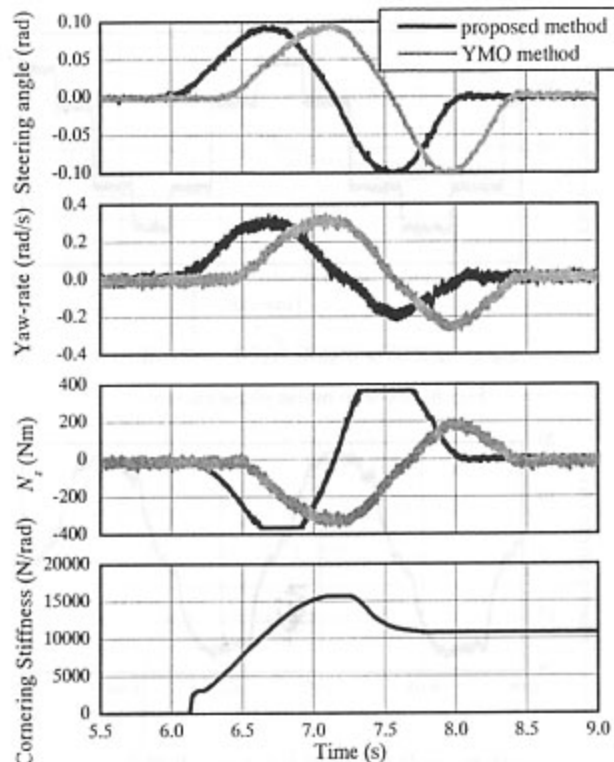


図 12 走行安定化制御実験結果

Fig. 12. Experimental results of vehicle stabilizing control.

- 齋藤・藤本・野口:「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」, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-03-52, pp.41-46 (2003-3)
- (4) A. Tsumasaka, H. Fujimoto, and T. Noguchi: "Cornering Stiffness Estimation of Electric Vehicle Based on Yaw-Moment Observer", *Proc. of the 2003 Japan Ind. Appl. Soc Conf.*, vol.2, 2-51, pp.551-552 (2003-9) (in Japanese)
 榎坂・藤本・野口:「ヨーモーメントオブザーバを用いた電気自動車のコーナリングスティフネス推定」, 電気学会産業応用全国大会, vol.2, 2-51, pp.551-552 (2003-9)
 - (5) A. Tsumasaka, H. Fujimoto, and T. Noguchi: "Yaw-Moment Stabilization Control of Electric Vehicle Based on Cornering Stiffness Estimation", *2004 National Convention Record IEE Japan*, 4-191, pp.308-309 (2004-3) (in Japanese)
 榎坂・藤本・野口:「コーナリングスティフネス推定値を用いた電気自動車のヨーモーメント安定化制御法」, 平成16年電気学会全国大会, 4-191, pp.308-309 (2004-3)
 - (6) H. Fujimoto, B. Yao: "Position Control of Linear Motors Based on Multirate Adaptive Robust Control", *Proc. of the 2004 Japan Ind. Appl. Soc Conf.*, vol.2, 2-29, pp.387-392 (2004-9) (in Japanese)
 藤本・野口:「マルチレート適応ロバスト制御に基づくリニアモータの位置決め制御」, 電気学会産業応用全国大会, vol.2, 2-29, pp.387-392 (2004-9)
 - (7) I. Takahashi, H. Haga: "Power Factor Improvement of Signal-Phase Diode Rectifier Circuit By Field-Weakening of Inverter Driven IPM Motor", *T. IEE of Japan*, Vol.123-D, No.12, pp.1467-1473 (2003-12) (in Japanese)
 高橋・芳賀:「IPM モータの弱め界磁を利用した单相ダイオード整流回路の入力力率改善法」, 電学論D, 123, pp.1467-1473 (2003-12)

原稿受付日

平成16年12月21日