

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ヨーモーメント安定化制御法

裙坂昭生* 藤本博志 野口季彦 (長岡技術科学大学)

Yaw-Moment Stabilization Control of Electric Vehicle Based on Cornering Stiffness Estimation
Akio Tsumasaka, Hiroshi Fujimoto, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

筆者らはこれまでにインホイールモータを搭載した左右二輪独立駆動電気自動車に関して、ヨーモーメントオブザーバを用いた車両安定化制御法、コーナリングステイフネス推定法を提案し、雪面など悪条件下での実験による制御法の有効性、オフライン実験による推定法の妥当性を検証してきた⁽¹⁾⁽²⁾。提案した制御法の特長として、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により一括補償するシンプルな制御アルゴリズムが挙げられる。しかし、すべり角 β 、コーナリングステイフネス C などを推定し、車両モデルを用いて制御すれば、より正確で高度な制御が実現できると考えられる⁽³⁾。

そこで、本稿ではコーナリングステイフネス推定値を用い、単純化した車両モデルに基づく適応制御法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションにより確認したので報告する。

2. 車両運動安定化制御法

車体のローリングを無視し、一定速度で走行している四輪車を車軸に対して等価的な前後二輪の車両で置き換えると、車両の水平面内における運動方程式は次式で与えられる。

$$mV \left(\frac{d\beta}{dt} + \gamma \right) = -2 \left\{ C_f \left(\beta + \frac{l_f}{V} \gamma - \delta \right) + C_r \left(\beta - \frac{l_r}{V} \gamma \right) \right\} \quad (1)$$

$$I \frac{d\gamma}{dt} = \left\{ -2C_f \left(\beta + \frac{l_f}{V} \gamma - \delta \right) l_f + 2C_r \left(\beta - \frac{l_r}{V} \gamma \right) l_r \right\} + N_z - N_d \quad (2)$$

ただし、 m は車両重量、 V は車両速度、 β はすべり角、 γ はヨーレート、 δ は舵角、 I はヨー軸回りの車両慣性、 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、 C_f 、 C_r は前輪、後輪のコーナリングステイフネスであり、 N_d は路面状況の変化、横風などによる外乱モーメント、 N_z は 2 つのインホイールモータの駆動力差により生成されるヨー軸回りのモーメントである。(2)右辺の括弧内でタイヤに発生するトルクを N_t とし、さらに $N_{dt} = N_d - N_t$ とおくと、(2)は、

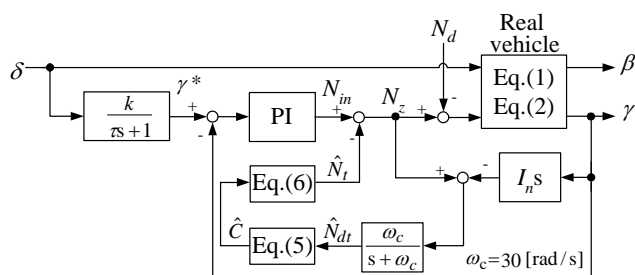


図 1 提案する車両安定制御ブロック線図

Fig. 1. Block diagram of proposed vehicle stability control.

$$I \frac{d\gamma}{dt} = N_z - N_{dt} \quad (3)$$

と定式化できる。モデル簡単化の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イフネスを $C_f = C_r = C$ と仮定すると、

$$N_{dt} = -C \left(-\frac{4l^2}{V} \gamma + 2l\delta \right) + N_d \quad (4)$$

と表わされる。(4)の括弧内を ζ とすれば、Fig. 1 の外乱オブザーバ出力から、

$$\hat{N}_{dt} = -C\zeta + e \quad (5)$$

となる。ここで、 e は N_d とオブザーバ誤差からなる項で、これが十分小さいかホワイトであれば、最小二乗法により C を推定できる⁽²⁾。推定した \hat{C} 、測定可能なパラメータからなる ζ から N_t 推定値は、

$$\hat{N}_t = \hat{C}\zeta \quad (6)$$

となり、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. 1 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}_t により系がノミナル化され、

$$\gamma = \frac{1}{I_n s} N_{in} \quad (7)$$

となる。ただし、上式において $N_d = 0$ としている。また、マイナーな制御系により車輪は完全な粘着状態を保つと仮定し、任意の駆動力モーメントを発生できるものとしている⁽¹⁾。

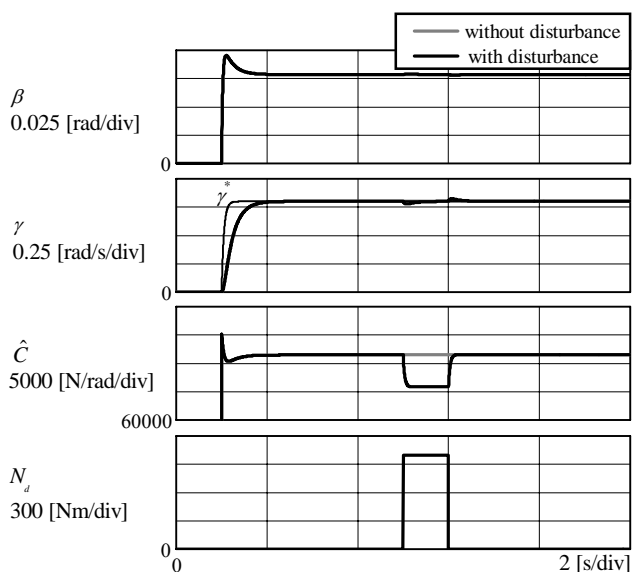


図 2 提案法によるシミュレーション結果
Fig. 2. Simulation results of proposed method.

3. 計算機シミュレーション

Fig. 1 に構成されたブロックにおいて,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], $V=60$ [km/h], $I=1000$ [kgm²], $l=0.64$ [m], $l_f=0.689$ [m], $l_r=0.591$ [m], $C_f=C_r=70000$ [N/rad] とし舵角 δ は, 0.2 [rad] のステップ入力とする。また, コーナリングステイフネス推定には重みつき逐次形最小二乗法を用い, 忘却計数 λ は収束性を考慮して $\lambda=0.93$ とした。推定では ζ 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ある。外乱オブザーバのカットオフ周波数 ω_c は実際の実験システムを想定して $\omega_c=30$ [rad/s] と設定した⁽¹⁾。

Fig. 1 において, 舵角 δ からヨーレート指令 γ^* までの規範モデルは, 実験的に得られた値を参考に, $\tau=0.05$ [s], $k=4$ [s⁻¹] と設定した。両条件の場合の γ と β の応答に関するシミュレーション結果を Fig. 2 に示す。入力外乱ありの場合もなしの場合と同様に外乱を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, 従来法に対する本制御法の特長は, パラメータ推定とモデルを用いて, より正確な \hat{N}_t 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}_t と従来法である Fig. 3 の \hat{N}_{dt} の比較を行った。Fig. 4 に真値 N_t と \hat{N}_t , \hat{N}_{dt} , 真値との誤差を示す。シミュレーション条件は入力外乱 N_d なしで上記と同じである。入力外乱がないので Fig. 3 の \hat{N}_{dt} は N_t を推定していることになる。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, より忠実に補償していることが確認できる。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

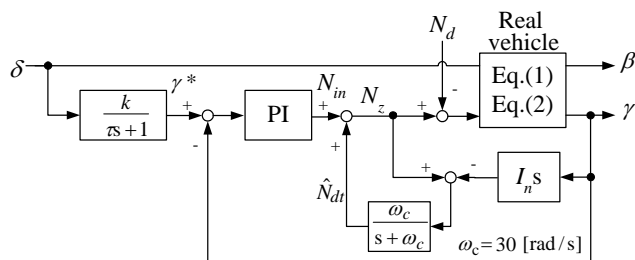


図 3 ヨーモーメントオブザーバを用いた車両安定化制御ブロック線図
Fig. 3. Block diagram of vehicle stability control based on yaw-moment observer.

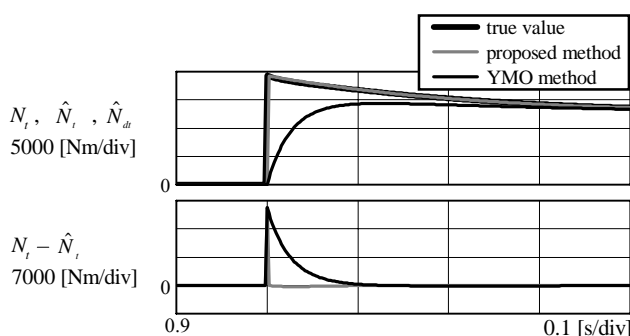


図 4 オブザーバ出力による比較
Fig. 4. Improvement by observer output.

は外乱が路面状況の変化として捉えられ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イフネスの変動として捉え, 一括補償していると言える。

4. まとめ

本稿では, 今まで未知パラメータと考えていたコーナリングステイフネス推定値を用い, 車両モデルに基づいたヨーモーメント安定化制御法を提案し, その有効性を計算機シミュレーションにより確認した。また, 外乱やパラメータ誤差にも感度が低く, 安定した車両運動安定化制御が可能であることが確認できた。簡単化したモデル, コーナリングステイフネス推定値を用いて, 忠実に路面発生力を再現し, ノミナル化できることの優位性を示した。今後は, 実験による検証を行って提案法の有効性を示す。

文 献

- (1) 斎藤健生・藤本博志・野口季彦:「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, pp.41-46 (2003)
- (2) 裙坂昭生・藤本博志・野口季彦:「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イフネスの推定」, 電気学会産業応用部門大会, pp.551-552 (2003)
- (3) 井上友子・長瀬啓明・堀洋一:「電気自動車の車体すべり角の推定と制御に関する基礎研究」, 電気学会全国大会, pp.346-347 (2002)