

# 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の推定

裾坂昭生<sup>†</sup> 藤本博志 野口季彦 (長岡技術科学大学)

## Cornering Stiffness Estimation of Electric Vehicle Based on Yaw-Moment Observer

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

**Abstract** – This paper describes a simple cornering stiffness estimation method based on a yaw-moment observer for electric vehicles. An advantage of the proposed method is that the estimation algorithm depends only on the measurable signals. Thus, it does not need to estimate the vehicle slip angle that is hard to measure or identify. The cornering stiffness of  $6.95 \times 10^4$  [N/rad] was obtained by the proposed estimation technique from experimental data.

キーワード：電気自動車，コーナリングスティフネス，ヨーモーメント，外乱オブザーバ，最小二乗推定法

Keywords：Electric vehicle, cornering stiffness, yaw-moment, disturbance observer, least-squares estimation

### 1. はじめに

筆者らはこれまでにホイールインモータを用い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運動安定化制御を提案し，雪面などの悪条件下で実験的によりその制御特性を検証してきた<sup>[1]</sup>。そこでは，路面状況に依存するパラメータの影響はロバスト制御により一括補償する方法を採用していたが，そのパラメータがシンプルな方法で推定できれば，計器によりドライバーに通知したりヨーレート指令値の生成に用いるなど，極めて有用性が高いと考えられる。そこで本稿では車体すべり角など推定困難なパラメータを使用せず，ヨーモーメントオブザーバに基づいたシンプルなコーナリングスティフネス推定法を提案し，測定した実験データから良好な推定結果が得られたので報告する。

### 2. コーナリングスティフネス推定アルゴリズム

#### 2.1 車両運動方程式

車両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(1)，(2)となる<sup>[2]</sup>。

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

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

ただし， $m$  は車両重量， $V$  は車両速度， $\beta$  はすべり角， $\gamma$  はヨーレート， $\delta$  は舵角， $I$  は車両慣性， $l_f$ ， $l_r$  はそれぞれ車

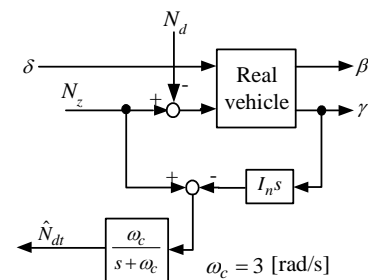


図1 ヨーモーメントオブザーバ

Fig. 1. Yaw-moment observer.

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ィフネスである。

#### 2.2 ヨーモーメントオブザーバ

(2)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(2)では考慮されていなかった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，(2)は，

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

と定式化できる<sup>[1]</sup>。ただし， $N_d = N_d - N_i$  である。また，簡単化のため車両重心から前輪軸，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  $C_f = C_r = C$  と仮定すると，

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

と表される。ここで、(4)の右辺の括弧内を $\zeta$ とし、(3)、(4)と図1に示されるオブザーバ出力 $\hat{N}_{dt}$ から、

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

と表すことができる。 $e = N_{dt} - \hat{N}_{dt}$ 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ィフネス $C$ の推定が可能となる。ただし、 $\hat{N}_{dt}$ はオブザーバの推定誤差 $N_{dt} - \hat{N}_{dt}$ である。(5)からわかるように検出が困難な $\beta$ 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 $\delta$ 、 $\gamma$ 、 $V$ から容易に $C$ を推定できる。

### 2.3 重みつき逐次形最小二乗法

コーナリングスティ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(6)に、適応ゲインの更新式を(7)に示す<sup>[3]</sup>。

$$\hat{C}(k) = \hat{C}(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\zeta(k)}{\lambda + \zeta^2(k)\Gamma(k-1)} [\zeta(k)\hat{C}(k-1) - \hat{N}_{dt}(k)] \quad (6)$$

$$\Gamma(k) = \frac{1}{\lambda} \left[ \Gamma(k-1) - \frac{\Gamma^2(k-1)\zeta^2(k)}{\lambda + \zeta^2(k)\Gamma(k-1)} \right] \quad (7)$$

ここで、 $\lambda$ は忘却係数であり、本推定法ではノイズの影響と収束性を考慮し $\lambda=0.93$ とした。

## 3. コーナリングスティフネス推定結果

### 3.1 推定特性の実験検証

実験は乾燥したアスファルト路面で行った。このときのサンプリング周期は15 [ms]としている。実験では、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。舵角 $\delta$ はステップ入力とし、実験により得られた $\delta$ 、ヨーレート $\gamma$ 、車速 $V$ の各測定値から(5)~(7)を用いてオフライン推定を行った。推定では(5)の入力である $\zeta$ に閾値を設け推定に有効な信号が来なくなると、推定値を更新せず値を保持するようにしている。また、 $\zeta$ の生成にも $\hat{N}_{dt}$ と同じローパスフィルタを採用している。図2に測定、推定結果を示す。図2は上から $\gamma$ 、 $\delta$ 、 $V$ の測定値、 $\zeta$ 、 $\hat{N}_{dt}$ の計算値、コーナリングスティフネス推定値 $\hat{C}$ を示しており、0.39 [s]で $\hat{C}=6.95 \times 10^4$  [N/rad]の収束値が得られた。

### 3.2 推定結果に対する考察

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 $\gamma$ が推定値から再現できるか検証した。検証方法としては、推定に使用しなかった測定データの系列 $\delta$ 、 $V$ と前節で得られた推定値 $\hat{C}$ を(4)に代入し計算機を用いて $\gamma$ をオフライン計算し、実際に測定された $\gamma$ との比較を行った。図3に $\delta$ がステップ入力、正弦波入力各場合の再現結果を示す。操舵の方法に関係なく良好に $\gamma$ が再現できており提案する推定法の妥当性が確認できた。

## 4. まとめ

本稿では、前後輪を等価的な二輪モデルと考え、ヨーモ

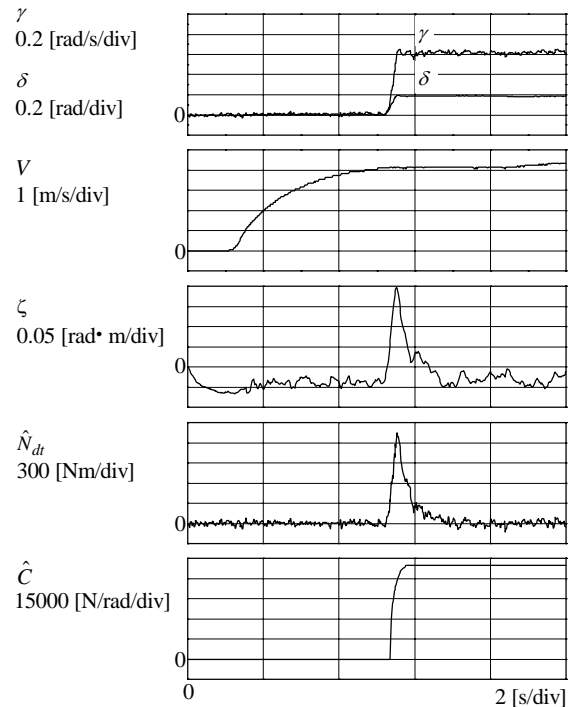


図2 推定実験結果

Fig. 2. Estimation results on experiments.

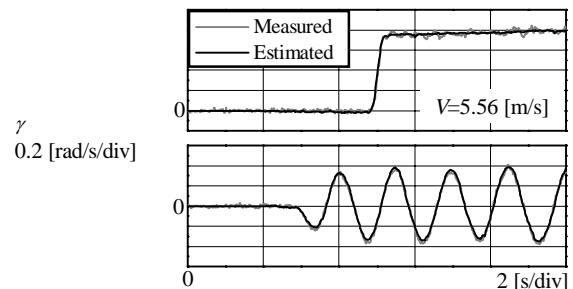


図3 推定値の検証結果

Fig. 3. Verification of estimated parameter.

ーメントオブザーバからの出力と測定可能なパラメータからコーナリングスティフネス推定が可能であることを、理論ならびにオフライン実験結果により明らかにした。また、検証結果より推定値の妥当性を確認した。雪面などの悪条件下で推定値をドライバーに示すことによって、路面状況に応じた運転を促すことができると考えられる。今後は推定値をヨーレート指令値の生成に用いることを検討する。

## 文 献

- [1] 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*, pp.41-46 (2003) (in Japanese)  
斎藤・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 (平 15)
- [2] 安部：「自動車の運動と制御 [第二版]」山海堂 (平 15)
- [3] 堀・大西：「応用制御工学」丸善株式会社 (平 10)