

# 車体横すべり角 $\beta$ を推定する線形オブザーバに関する考察

井上友子, 堀洋一 (東京大学)

Consideratiopn on Linear Observers to Estimate Vehicle Body Slip Angle  $\beta$

Tomoko INOUE, Yoichi HORI, (University of Tokyo)

Vehicle's body slip angle, often referred as  $\beta$ , increases in a dangerous driving situation such as drifting or slipping and needs to be suppressed in these situations. However,  $\beta$  is hard to measure without expensive optic sensors. Thus we need to estimate  $\beta$  with an observer. The proposed linear observer is robust to the model error, and performs well even when a driving situation is in its non-linear region.

キーワード : 車体横すべり角、線形オブザーバ、電気自動車

## 1. はじめに

図1は近年盛んに研究されているアクティブセーフティ技術を模式的に表した図である。中でもVSC<sup>†</sup>のような高度な技術の登場に伴い、車両の様々な信号を測定し制御する必要が生じてきた。そのような信号として一般的なのは、図2に示すヨーレート  $\gamma$  と車体横すべり角  $\beta$  である。 $\gamma$  は

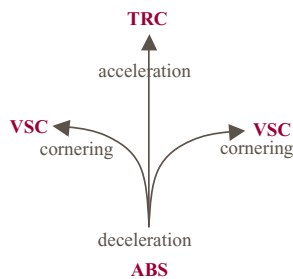


図1 アクティブセーフティ技術  
Fig. 1. Active Safety Technology

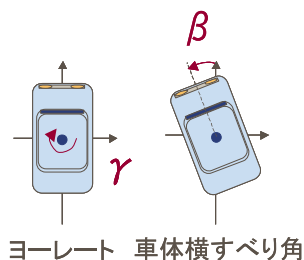


図2 制御対象  
Fig. 2. Variables to Be Controlled

車体重心の回転角速度であり、ジャイロセンサで簡単に測定できる。これに対し  $\beta$  は車体の向いている方向と車体速度のなす方向のつくる角度を指し、その測定には高価な対地センサを必要とするため、コストとセンサ性能の問題から推定によって求めることが一般的である。

一般に滑りやすい路面における旋回時にタイヤ-路面間の粘着が失われたとき、 $\beta$  は大きくなり、ドライバが横方向の運動を制御することが不可能になる<sup>(1)</sup>。ゆえに  $\beta$  を推定し、補償ヨーモーメントの生成によってそれを制御することは、車体運動の安定化に大きく貢献する。

本論では車両運動の非線形領域においても比較的正確な推定をし、かつモデルエラーにロバストな線形オブザーバを用いた  $\beta$  推定について論ずる。

## 2. 車両運動の非線形性

$\beta$  を推定するに当たっては、車両運動の非線形性を考慮しなければならない。

危険な旋回などで図3に示すタイヤの横すべり角  $\alpha$  が大きくなると、タイヤに働く横力  $F_y$  は増加する。 $\alpha$  と  $F_y$  には図4の右上の図のような関係が存在し、 $\alpha$  に対して  $F_y$  が比例している領域をタイヤ特性の線形領域といい、その比例

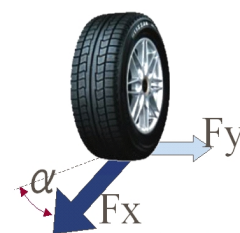


図3 タイヤモデル  
Fig. 3. Tire Model

<sup>†</sup>Vehicle Stability Control: 車体の横方向の運動制御。VDC(Vehicle Dynamics Control),VSA(Vehicle Stability Assist)と呼ばれることもある。

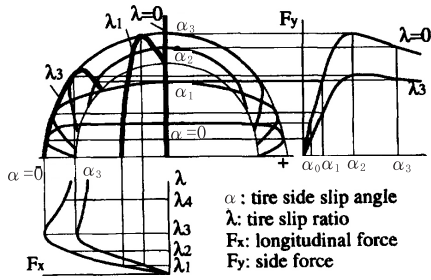


図 4 タイヤの非線形性  
Fig. 4. Non-linearity of the Tire Characteristic

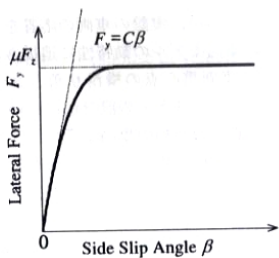


図 5 車両運動の非線形性  
Fig. 5. Non-linearity of the Vehicle Dynamics

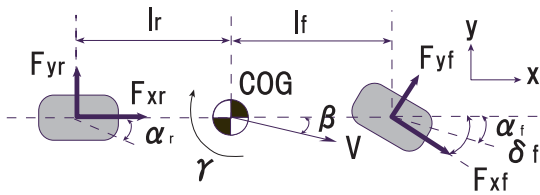


図 6 車両の二輪モデル  
Fig. 6. Two Wheeled Model of Vehicle

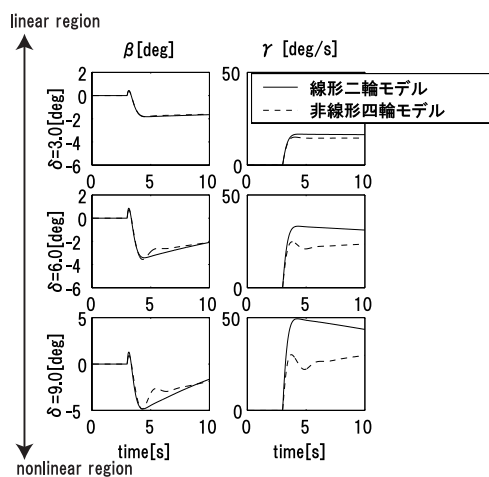


図 7 線形二輪モデルのモデルエラー  
Fig. 7. Modeling Error of the Two-Wheeled Model

係数をコーナリングパワー (以下 CP) と呼ぶ。それに対し  $F_y$  が飽和している領域をタイヤ特性の非線形領域と呼ぶ。

図 5 に示すように、車体横すべり角  $\beta$  と車体にかかる横力  $\Sigma F_y$  にも同様の関係が成り立ち、 $F_y$  が  $\beta$  に比例する領域を車両運動の線形領域、飽和する領域を車両運動の非線形領域と呼ぶ<sup>(2)</sup>。

車両を図 6 に示す二輪のモデルに近似したとき、プラントの線形方程式は (1) 式で表され、その入力は舵角  $\delta_f$ 、状態量は  $\gamma$  と  $\beta$  である。このようなモデルは車両運動が線形領域にあることを前提としている。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad u = \delta_f \quad x = \begin{pmatrix} \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-2(C_f+C_r)}{mV} & \frac{-2(C_f l_f - C_r l_r)}{mV^2} - 1 \\ \frac{-2(C_f l_f - C_r l_r)}{I} & \frac{-2(C_f l_f^2 + C_r l_r^2)}{IV} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{2C_f}{mV} \\ \frac{2C_f l_f}{I} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

車両運動の線形領域と非線形領域はある点を境にはっきり分かれるというわけではない。図 7 では初速 20m で緩やかに加速中、三秒後に舵角をステップ状に  $\delta$  度右に切った時を想定しているが、この場合  $\delta$  が大きいと車両運動が非線形領域に近いと言える。図 7 より、線形二輪モデルと実際に近い非線形四輪モデルの計算する  $\beta$  と  $\gamma$  の値には車両運動が非線形領域にある程、大きな差が生じることが分かる。これは線形二輪モデルが「タイヤが横すべりせずにくらでも横力を発生する楽観的なモデル」であることに起因する。

### 3. $\gamma$ だけの観測に基づくオブザーバ

このような問題があるために、 $\gamma$  だけの観測に基づくオブザーバはその推定の正確さにおいて問題がある。

従来、オブザーバによる推定手法では二つの状態量のうち把握できる一つの状態量を利用しもう片方を推定する方法が一般的であった。(このような手法には同一次元オブザーバと最小次元オブザーバという二種類の手法が一般的でありどちらでの推定も可能であるが、本論では一つの状態量  $\gamma$  を用い  $\hat{\gamma}$  と  $\hat{\beta}$  の両方を推定する同一次元オブザーバを用いる。)

しかし前章に示したように車両運動には非線形性があるために、ジャイロセンサで得られる信号  $\gamma$  の値だけをオブザーバ入力とする  $\beta$  推定オブザーバは、車両運動の非線形領域において推定値に大きな誤差を生じてしまう。

このようなオブザーバの方程式は (4) 式、(5) 式であらわされる。

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - K(\hat{y} - y) \quad (4)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad C = (0, 1) \text{ より } y = \gamma \dots\dots\dots (5)$$

また、極配置は<sup>(2)</sup> になら  $\lambda_1 = -\frac{C_f+C_r}{mV}$ ,  $\lambda_2 = -200$  とする。

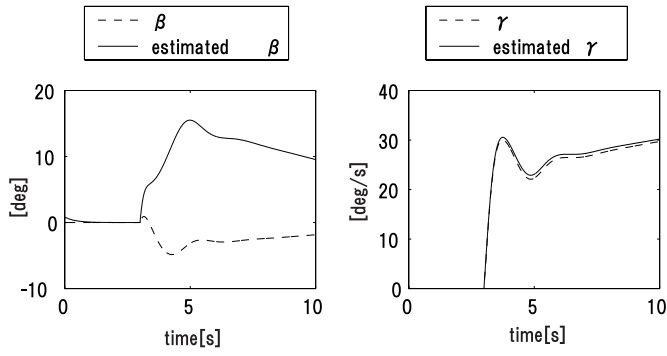


図 8  $\gamma$  だけの観測に基づく線形オブザーバによる  $\beta$  推定

Fig. 8.  $\beta$  Estimation Using Linear Observer Based on  $\gamma$  Signal

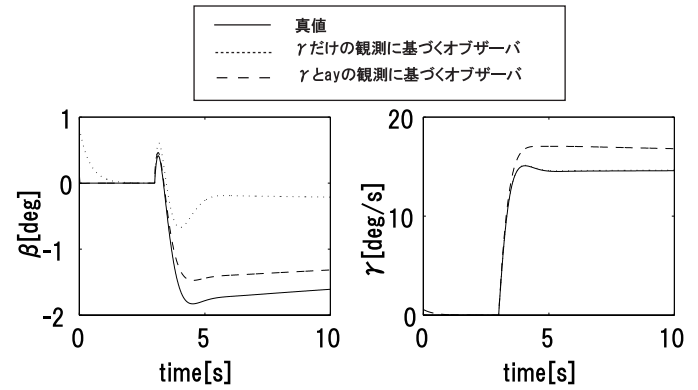


図 11  $\gamma$  と  $a_y$  の観測に基づく線形オブザーバによる  $\beta$  推定

Fig. 11.  $\beta$  Estimation Using Linear Observer Based on  $\gamma$  and  $a_y$  Signal

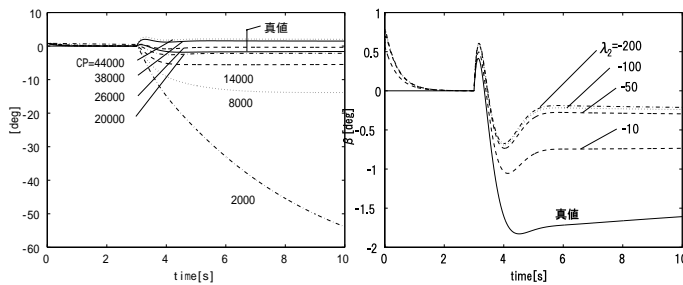


図 9 CP の誤差による影響

図 10 極の変化による影響

Fig. 9. Effect of Model Errors in CP Fig. 10. Effect of Pole Assignment

図 8 は初速 20m で緩やかに加速中、三秒後に舵角をステップ状に 9 度右に切った時、即ち車両運動が非線形領域にあるときのシミュレーションである。二輪モデルに基づく  $\hat{\gamma}$  と出力  $\gamma$  の差が 0 になるようにオブザーバゲイン  $K$  をかけてフィードバックし  $\hat{\beta}$  を計算しているの、モデル誤差が大きいこのような運動状況においては  $\beta$  をうまく推定できていない。

図 9 は初速 20m で穏やかに加速中 3 秒後に舵角をステップ状に 3 度切ったとき、モデル中の CP を変えて  $\beta$  を推定した結果である。CP によって推定値にばらつきが見られ、オブザーバがモデルエラーにロバストでないことが分かる。

また、図 10 は同様の実験状況でオブザーバの極の一つ  $\lambda_2$  を変えて推定した結果である。極が遅すぎると値は正確でなくなっている。

#### 4. $\gamma$ と $a_y$ の観測に基づくオブザーバ

提案するオブザーバは前述の問題を解決するオブザーバであることを以下に示す。

$$a_y = V(\dot{\beta} + \gamma) \dots\dots\dots (6)$$

$$= V(A_{11}\beta + A_{12}\gamma + B_1u + \gamma) \dots\dots\dots (7)$$

(6) 式は、横方向の運動方程式である。横加速度  $a_y$ 、車速  $V$ 、ヨーレート  $\gamma$  はみなセンサで測定できるため、(6) 式に

代入し  $\dot{\beta}$  を計算することができる。この値を積分して  $\beta$  の推定値とする方法を直接積分法と呼ぶ。直接積分法はモデルと関係ないので推定値はモデル化誤差の影響を受けないため、車両運動が非線形領域にあっても値を信用することができる。ただし、センサエラーと傾斜地における重力の影響を受けるという短所も合わせ持つため、直接積分法を単独で推定に用いることはない。

提案するオブザーバは、(1) 式に習い (6) 式を (7) 式に変形し、 $a_y$  を  $\gamma$  とともにオブザーバの入力信号とする。オブザーバの方程式は以下のように表される。ただし  $A_{ij}$  は行列  $A$  の  $i$  行  $j$  列成分である。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad x = \begin{pmatrix} \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

$$y = Cx + Du \dots\dots\dots (9)$$

$$y = \begin{pmatrix} \gamma \\ a_y \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ VA_{11} & V(A_{12} + 1) \end{pmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 \\ VB_1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

ここでもオブザーバには同一次元オブザーバを用い、 $\gamma$  と  $\beta$  の両方を推定する。極は前章で述べたオブザーバと同様のものを用いた。

図 11 は初速 20m で緩やかに加速中、三秒後に舵角をステップ状に 3 度右に切った時、提案するオブザーバを用い  $\beta$  を推定したシミュレーションである。前述の  $\gamma$  だけをオブザーバ入力とするオブザーバによる出力に比べ、はるかに正確な推定に成功している。

モデル中の CP を変えて  $\beta$  を推定した結果が図 12 である。CP パワーにモデルエラーがあったとしても、図 9 に比べ推定値への影響は少ないことがわかる。

また、図 13 はオブザーバの極の一つを変えて推定した結果である。図 10 と同様に極が遅すぎると推定値は正確でな

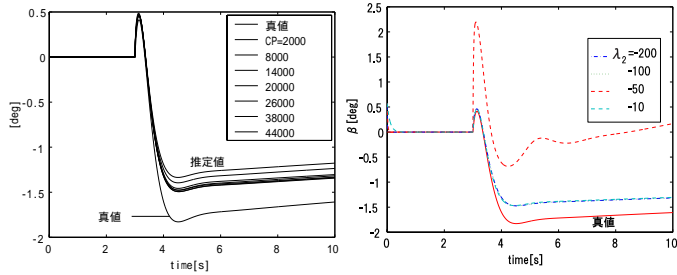


図 12 CP の誤差による影響 図 13 極の変化による影響

Fig. 12. Effect of Model Errors in CP Fig. 13. Effect of Pole Assignment



図 15 東大三月号 II の外観

Fig. 15. UOT March-II

くなる事が分かる。

提案するオブザーバの特徴を以下のようにまとめる。

- 線形オブザーバであるので、自由に極配置を出来るという自由度は持ち合わせたままである
- しかしながら、車両運動の非線形領域でも比較的正確な推定ができる
- コーナリングパワー等のモデルエラーにもロバストである

#### 5. 電気自動車を用いた車体横滑り角制御の可能性

電気自動車の駆動源であるモータには、以下のような特徴がある<sup>(3)</sup>。

- トルク指令値を数値で与えることができる
- トルク応答がガソリン車のそれと比べ 2 桁速い
- 小型化が可能のため分散配置が出来る
- 制動方向にも駆動方向にもトルクを出せる

最初の二点は軸ごとの速いフィードバック制御ループを組むのに有用であり、最後の二点は図 14 に示すような自由度の高い DYC を可能にする。

このようなモータの特徴を生かし、2001 年初頭に完成した完全四輪独立駆動電気自動車「東大三月号 II」を用いた DYC は、 $\beta$  制御に貢献することが期待される。図 15 は東

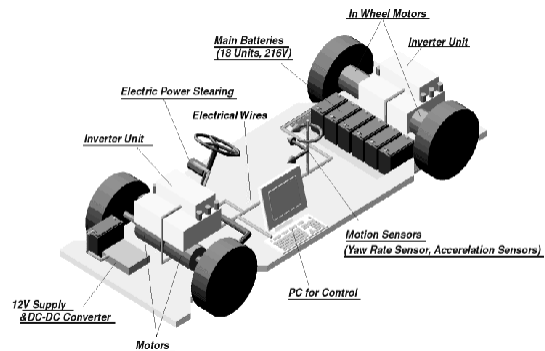


図 16 東大三月号 II の概念

Fig. 16. Specification

大三月号 II の外観を、図 16 は機能を示す。

今後の課題として、東大三月号を用いた  $\beta$  推定と制御の実験が挙げられる。

#### 6. 結 論

- 車体横すべり角推定において、従来の線形オブザーバを用いると車両挙動の非線形領域においてモデル化誤差が大きいことを示した。
- 提案するオブザーバは、車両の非線形領域において特に効果を発揮する線形オブザーバであることをシミュレーションで示した。
- 電気自動車を用いた車体すべり角制御の可能性を示した。

#### 文 献

- (1) Kihong Park and Seung-Jin Heo: Design of a Control Logic for Improving Vehicle Dynamic Stability, Proceedings of AVEC 2000, August 2000
- (2) A. Daiβ, U. Kiencke: Estimation of Tire Slip during Combined Cornering and Braking Observer Supported Fuzzy Estimation, Proceedings of IFAC 1996, pp. 41-46
- (3) Shin-ichiro Sakai, Hideo Sado and Yoichi Hori: Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors, IEEE Trans. on Mechatronics, Vol.4, No.1, pp.9-16, 1999.03

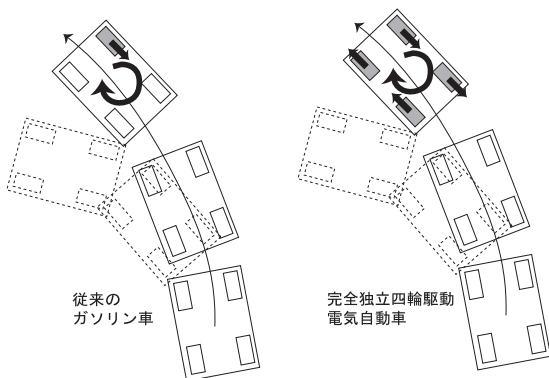


図 14 電気自動車による DYC

Fig. 14. DYC with EV