

# 電気自動車における車体すべり角オブザーバのロバスト化 と実車データによる検証

学生員 青木 良文\* 正員 堀 洋一\*\*

Robust Design of Body Slip Angle Observer for Electric Vehicles and its Experimental  
Demonstration

Yoshifumi Aoki\*, Student Member, Yoichi Hori\*\*, Member

Electric Vehicles (EVs) are inherently suitable for 2-Dimension vehicle motion control. To utilize EV's advantages, body slip angle  $\beta$  and yaw rate  $\gamma$  play an important role. However, as sensors to measure  $\beta$  are very expensive, we need to estimate  $\beta$  from only variables to be measurable. In this paper, an improved estimation method for body slip angle  $\beta$  for EVs is proposed. This method is based on a linear observer using side acceleration  $a_y$  as well as  $\gamma$  information. We especially considered the design of gain matrix and succeeded in exact and robust estimation. We performed experiments by UOT MarchII. This experimental vehicle driven by four in-wheel motors was made for research on advanced control of EVs. Some experimental results are shown to verify the effectiveness of the proposed method.

キーワード：電気自動車 車体すべり角 ヨーレート 横加速度 ロバスト 線形オブザーバ

Keywords: Electric Vehicle, Body slip angle, Yaw rate, Side acceleration, Robust, Linear observer

## 1. 序 論

電気自動車 (EV) は環境によいことから今日のエネルギー問題を解決する手立てとして注目されている。特に電気モータとエンジンを組み合わせたハイブリッド自動車はここ近年頻繁に見かけるようになってきており、数年のうちにハイブリッド自動車が一般的な乗用車として使われることは間違いない。しかし電気自動車の長所はクリーン、高効率といったものだけではなく、電気モータを駆動源にすることにより車両の運動制御の観点においても、内燃機関式自動車に対して次のような優位点を持っている<sup>(1)</sup>。

- (1) トルク指令からトルク出力までの応答が高速で正確  
モータのトルク応答速度は 1[msec] 程度であり、これはエンジンの 10 倍から 100 倍にあたる。EV では応答速度の速さを利用した高度な制御が可能に



図 1 東大三月号 II  
Fig. 1. UOT MarchII

なる。

- (2) 出力トルクの大きさが正確にわかる  
タイヤと路面の間に生じる駆動力、制動力の推定がリアルタイムで可能になる。これにより、路面状態を考慮した、全く新しい制御が実現できる。
- (3) モータの小型化が可能  
モータの小型化により各タイヤにモータを分散配置できる。各タイヤのトルクを自由に制御できるので、内燃機関車より、車体すべり角  $\beta$ 、ヨーレート  $\gamma$  の制御、つまりは自動車の高度な二次元運動の制御が容易にできる。

\* 東京大学工学系研究科電気工学専攻  
〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1  
Department of Electrical Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

\*\* 東京大学生産技術研究所 情報・エレクトロニクス部門 電気制御システム工学  
〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1  
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo  
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

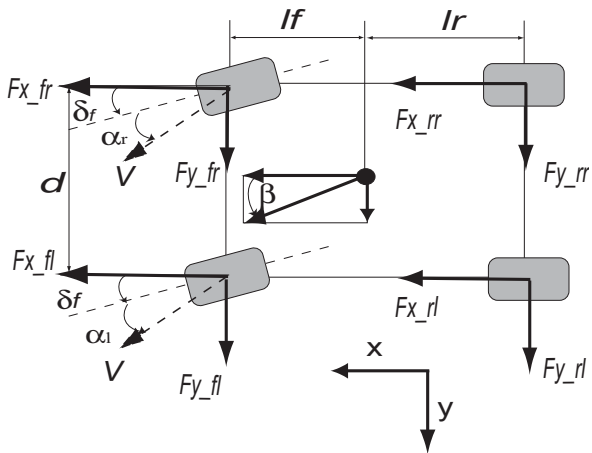


図 2 車両運動の 4 輪モデル

Fig. 2. Four-wheel model of vehicle motion

本稿ではこのような EV の特徴を活かした二次元運動の制御のために、観測しにくい  $\beta$  をヨーレート  $\gamma$ 、横加速度  $a_y$  から線形オブザーバを利用して間接的に求める手法と、モデルエラーに強いオブザーバゲインの設定法を提案する。さらに東大三月号 II(図 1) による実験によりその有効性を実証する。

## 2. 電気自動車のモデル化

オブザーバを構成するために車両のモデル化を行い、状態方程式で表現する。本研究では従来からよく知られている一般車両の 2 輪モデル<sup>(2)</sup>の電気自動車へ適応させたモデル<sup>(3)</sup>をオブザーバのノミナルプラントに用いた。厳密な 4 輪モデル(図 2)はシミュレーションモデルとして用いている。

4 輪モデルは車体の二次元運動を正確に表現するために必要であるが、非線形性を持つために、線形オブザーバを構成するには不向きである。そこで本稿では線形方程式で表現できる 2 輪モデル(図 3)を用いて、設計の容易な線形オブザーバを構成し、ロバスト化をおこなった。図 3 中の P は車両の重心、 $l_f$  は前輪から重心までの距離、 $l_r$  は後輪から重心までの距離、 $\alpha_f$  は前輪のスリップ角、 $\alpha_r$  は後輪のスリップ角、 $\delta_f$  はタイヤの実舵角を示す。

一般的に車両の運動方程式は式 (1) ~ (3) のように表現される。右辺の力を計算すると、運動方程式は  $\beta$ 、 $\gamma$ 、車体の重心速度  $v$  で表すことができる。

$$\begin{aligned} ma_x &= F_{x\_fl} + F_{x\_fr} + F_{x\_rl} + F_{x\_rr} \cdot (1) \\ ma_y &= F_{y\_fl} + F_{y\_fr} + F_{y\_rl} + F_{y\_rr} \cdot (2) \\ I\dot{\gamma} &= l_f(F_{y\_fl} + F_{y\_fr}) - l_r(F_{y\_rl} + F_{y\_rr}) \\ &+ N \dots \dots \dots (3) \\ N &= \frac{d}{2}(-F_{x\_fl} + F_{x\_fr} - F_{x\_rl} + F_{x\_rr}) \end{aligned}$$

ここで、

$F_{x\_fr}$ : 右前輪の生み出す制駆動力

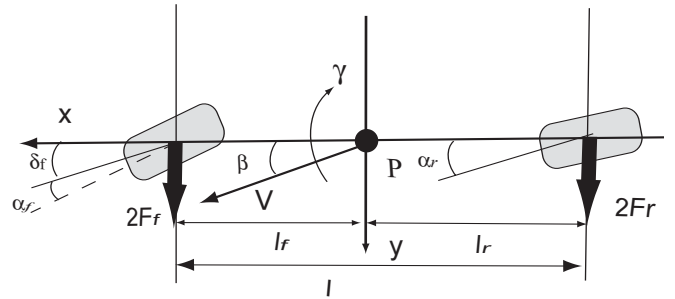


図 3 車両運動の 2 輪モデル

Fig. 3. Two-wheel model of vehicle motion

- $F_{x\_fl}$ : 左前輪の生み出す制駆動力
- $F_{x\_rr}$ : 右後輪の生み出す制駆動力
- $F_{x\_rl}$ : 左後輪の生み出す制駆動力
- $F_{y\_fr}$ : 右前輪の生み出す横力
- $F_{y\_fl}$ : 左前輪の生み出す横力
- $F_{y\_rr}$ : 右後輪の生み出す横力
- $F_{y\_rl}$ : 左後輪の生み出す横力
- $I$ : 車体慣性
- $m$ : 車体質量
- $N$ : 左右輪の制駆動力差
- $d$ : 左右のタイヤ間の距離

$F_{y\_fl}$  と  $F_{y\_fr}$  は線形領域においてはタイヤのすべり角  $\alpha$  に比例してタイヤに働く横力  $F_y$  が増加するため、次のような線形方程式 (4)、(5) により表現される。

$$F_f = F_{y\_fl} = F_{y\_fr} = \alpha_f C_f \quad (4)$$

$$F_r = F_{y\_rl} = F_{y\_rr} = \alpha_r C_r \quad (5)$$

となる。

コーナリングパワー  $C_f$ 、 $C_r$  は式 (6)、(7) で定義される。

$$C_f = \frac{\partial F_f}{\partial \alpha_f} \Big|_{\alpha_f=0} \quad (6)$$

$$C_r = \frac{\partial F_r}{\partial \alpha_r} \Big|_{\alpha_r=0} \quad (7)$$

また、前後方向の加速度  $a_x$ 、横加速度  $a_y$ 、 $\gamma$ 、 $\beta$ 、 $v$  には式 (8)、(9) の関係が成り立つ。

$$a_x = -v(\dot{\beta} + \gamma) \sin \beta + \dot{v} \cos \beta \quad (8)$$

$$a_y = v(\dot{\beta} + \gamma) \cos \beta + \dot{v} \sin \beta \quad (9)$$

$\beta$  は微小な角を想定しているので、 $\cos \beta \doteq 1$  と近似する。さらに式 (9) の第一項に対して  $\dot{v} \sin \beta$  は非常に小さいので第二項は無視できると仮定する。

$$a_y = v(\dot{\beta} + \gamma) \quad (10)$$

式 (1) ~ (10) より状態方程式 (11) が導かれる。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-2(C_f+C_r)}{mv} & \frac{-2(l_f C_f - l_r C_r)}{mv^2} - 1 \\ \frac{-2(l_f C_f - l_r C_r)}{I} & \frac{-2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{Iv} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{I} & 0 \\ \frac{2l_f C_f}{I} & \frac{1}{I} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \delta_f \\ N \end{bmatrix}$$

3. 従来の  $\beta$  推定方法

$\beta$  の推定方法には大きく分けて二つある。ひとつは直接積分法、もうひとつはオブザーバによる推定方法である。これらの従来の方法について解析していく。

3.1 直接積分法による推定法 直接積分による推定法とは式 (10) を変形した式 (12) から  $\beta$  を求めるものである<sup>(4)</sup>。

$$v(\dot{\beta} + \gamma) = a_y \Leftrightarrow \beta = \int \left( \frac{a_y}{v} - \gamma \right) dt \quad (12)$$

この方法の長所は式 (12) がタイヤの状態 (タイヤの特性やタイヤ 路面間の摩擦係数) に影響されないの、摩擦係数  $\mu$  の変化にロバストになる点にある。

しかし推定値の正確さが  $a_y, \gamma$  の値のみに起因してしまうため、高性能センサがないと  $\beta$  を正確に推定できないことがわかる。また直流オフセット分を積分することによりエラーが蓄積し、時間がたつにつれて誤差が大きくなってしまふという欠点を持つ。以上の理由から直接積分による推定法は実用的でない。

3.2 オブザーバによる推定法 オブザーバの長所は多少のモデルエラーに対してロバスト性を持っていること、用途によってオブザーバゲインを変化させることでオブザーバの性質を簡単に変えることができる点にある。しかしオブザーバによる推定にはプラントのモデリングが必要で、測定可能な信号によってオブザーバの性質は大きく影響を受ける。

$\beta$  を推定するオブザーバを構成する上で一般的に測定可能な信号は  $\gamma, \delta_f, v$  であるが、この三つの測定値だけではモデルエラーが過大であるため、正確に  $\beta$  が推定できないと言われてきた。

モデルエラーを小さくするために線形化を行わずに実際の車両に近い非線形モデルを用いカルマンフィルタ等を構成し、推定する方法も知られている<sup>(5) (6) (7) (8)</sup>。この方法は車両のあらゆるパラメータを正確に推定できるが、モデルが複雑すぎる、計算時間がかかるなどの欠点がありリアルタイムでの推定には向いていない。

4. 横加速度を用いた線形オブザーバの提案

リアルタイムで正確に  $\beta$  の推定を行うには、線形オブザーバを利用するのがよい。しかし線形オブザーバは前述したようにモデルエラーに対して必ずしもロバストではないため、本稿ではこの欠点を克服した、新しい線形オブザーバを提案する。今までの線形オブザーバは  $\gamma, \delta_f, v$  のみを利用してしたが、これらに加えて横加速度を利用すること

で非線形な運動領域でも正確に推定できるロバストな線形オブザーバを提案する<sup>(9)</sup>。

横加速度  $a_y$  をオブザーバに取り込むために、式 (10) と式 (11) を利用して  $a_y$  を次のように再構成する。

$$a_y = v(a_{11}\beta + a_{12}\gamma + b_{11}\delta + \gamma) \quad (13)$$

ただし行列  $A, B$  の成分をそれぞれ  $a_{11} \sim a_{22}, b_{11} \sim b_{22}$  としている。

以上より、出力方程式 (14) が導かれる。

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \dots\dots\dots (14)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ va_{11} & v(a_{12} + 1) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ vb_{11} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \gamma \\ a_y \end{bmatrix}$$

4.1 オブザーバの構成 本稿では式 (15)、(16) の同次元オブザーバを利用して、線形オブザーバを設計する。

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{K}(\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}) \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (16)$$

ここで  $\mathbf{K}$  はオブザーバゲインである。

推定誤差  $e = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}$  は式 (17) を満たす。

$$\dot{e} = (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})e \quad (17)$$

式 (17) は  $\mathbf{K}$  の値を変えることで  $\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C}$  の固有値を任意に指定できる。よって推定誤差を任意の特性で 0 に収束させることができる。

4.2 オブザーバゲインの決定法 オブザーバゲインの値によっては線形オブザーバはモデルエラーに対してロバスト性を失い、 $\beta$  が正確に推定できなくなることもある。よって、線形化により生み出される推定誤差を定量的に解析する必要がある。具体的には以下のような解析を行い、提案した線形オブザーバをロバスト化する条件を導出した<sup>(10)</sup>。

式 (13) と式 (15) により、オブザーバによる推定値  $\hat{\beta}$  が導かれる。

$$\dot{\hat{\beta}} = a_{11}\hat{\beta} + a_{12}\hat{\gamma} + b_{11}\delta_f - k_{11}(\hat{\gamma} - \gamma) - k_{12}(\hat{a}_y - a_y) \quad (18)$$

モデルエラーのない  $\beta$  の状態方程式は次式で表される。

$$\dot{\beta} = a'_{11}\beta + a'_{12}\gamma + b'_{11}\delta_f \quad (19)$$

$a'_{11}, a'_{12}$  と  $b'_{11}$  はモデルエラーを含まない実際の値を示す。

また、式 (18) と式 (19) により、 $\hat{\beta} - \beta$  は次のように計算される。

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\beta}} - \dot{\beta} &= (a_{11} - k_{12}v)(\hat{\beta} - \beta) \\ &+ [a_{12} - k_{12}v(a_{12} + 1) - k_{11}](\hat{\gamma} - \gamma) \\ &- (1 - k_{12}v)(a'_{11} - a_{11})\beta \\ &- (1 - k_{12}v)(a'_{12} - a_{12})\gamma \\ &- (1 - k_{12}v)(b'_{11} - b_{11})\delta_f \dots\dots (20) \end{aligned}$$

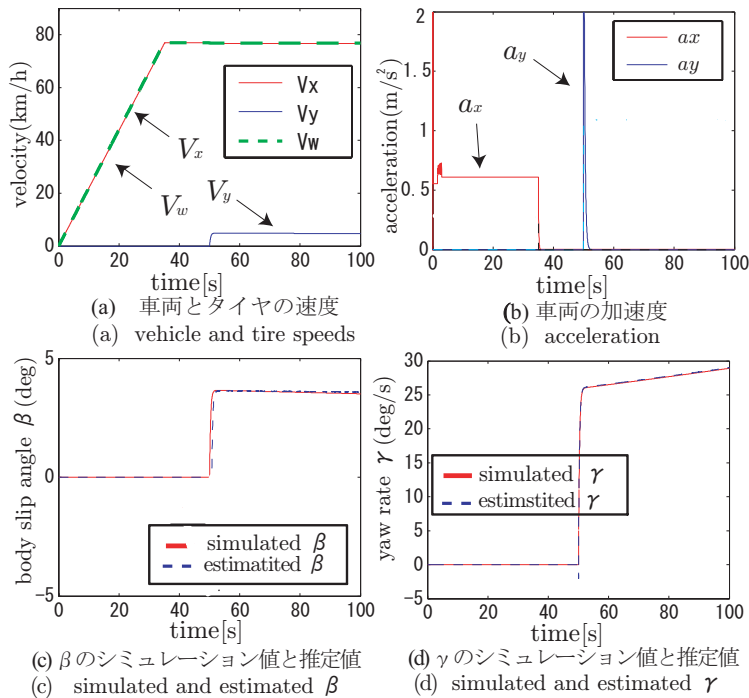


図4 シミュレーション結果

Fig. 4. Simulation results

ただし行列  $K$  の成分を  $k_{11} \sim k_{22}$  とした。

$\gamma$  はジャイロセンサにより測定できるため、 $\hat{\gamma}$  と  $\gamma$  は等しい。したがって提案したオブザーバが最もロバストであるための条件は次式のようにになる。

$$1 - k_{12}v = 0 \Leftrightarrow k_{12} = \frac{1}{v} \quad (21)$$

式 (21) により、式 (17) は次式のように表される。

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\lambda_1 \lambda_2 (lf - lr) I}{2C_f (lf^2 + lr^2 + 2lflr)} \\ \frac{2C_f}{(lfr)} (lf^2 + lr^2 + 2lflr) & -\lambda_1 - \lambda_2 \end{bmatrix} e \quad (22)$$

式 (22) の固有値は負であるため、 $\hat{\beta}$  は  $\beta$  に収束する。さらに極配置を考慮すると、 $K$  は次のように決定される。

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{C_f} \frac{(lf - lr) I}{2(lf^2 + lr^2) + 4lflr} - 1 & \frac{1}{v} \\ -\lambda_1 - \lambda_2 & \frac{m(lf^2 + lr^2)}{(lf - lr) I} \end{bmatrix} \quad (23)$$

ここで  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  はオブザーバの極である。

## 5. シミュレーションによる検証

**5.1 シミュレーションの概要** 車両による実験を行う前に、4輪非線形モデルを用いて提案したオブザーバの検証を行った。シミュレーションでは、以下のような状況を想定した。路面は乾いたアスファルトとし、シミュレーションの時間は100[s]とする。0~35[s]の間に前後輪のタイヤにそれぞれ556[N]のトルクを加え、35[s]でトルクを0[N]にし、50[s]に前輪の実舵角  $\delta_f$  を5[deg]の大きさを入力するシミュレーションを行った。シミュレーションモデルとして、東大三月号IIのパラメータを用いた。

**5.2 シミュレーション結果** 図4にシミュレーション

表1 東大三月号IIの諸装備

Table 1. Sensors of UOT MarchII

PC to control	Pentium MMX 223[MHz]
	AMD K6-233[MHz]
OS	Slackware Linux 3.5
	RTLinux rel. 9K
encoder pulse number	3600[ppr]
acceleration sensor	ANALOG DEVICES ADXL202
yaw rate sensor	HITACHI OPTICAL FIBER GYROSCOPE HOFG-CLI(A)
noncontact optical sensor	CORREVIT S-400

表2 実験内容

Table 2. Experimental conditions

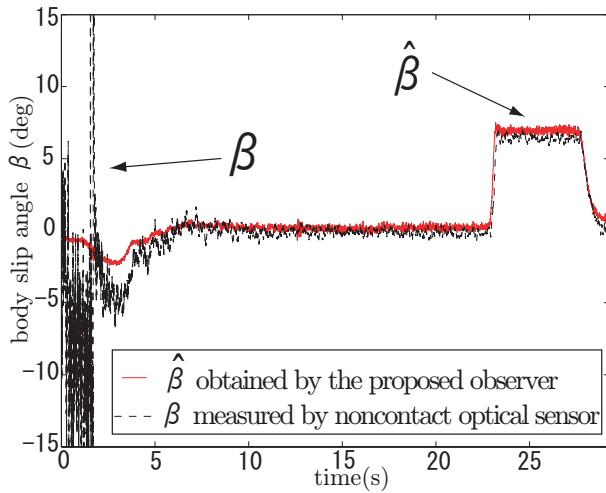
Experiment No.	$v$ [km/h]	$\delta_f$ [deg]	road type
1	40	8	dry
2	40	16	dry
3	EV was accelerated, and draws a circle with a radius of 26.5 meters on wet road		
4	In Experiment No.1, another observer gain with model error was used		

結果を示す。図4(a)は速度のグラフである。 $V_x$ は車体の前後方向の速度、 $V_y$ は車体の横速度、 $V_w$ はタイヤの速度を表す。図4(b)は加速度のグラフである。 $a_x$ は前後の加速度、 $a_y$ は横加速度を表している。図4(c)には $\beta$ のシミュレーション値と推定値を、図4(d)にはヨーレート $\gamma$ のシミュレーション値と推定値を示す。図4(c)を見ると $\beta$ のシミュレーション値と推定値が正確に一致していることから、オブザーバの有効性がシミュレーションにより検証された。また、立ち上がり時間は充分短くオーバーシュートも生じていないことから式(22)の極配置法は適している。以上より提案したオブザーバゲインの決定法は適当であると言える。

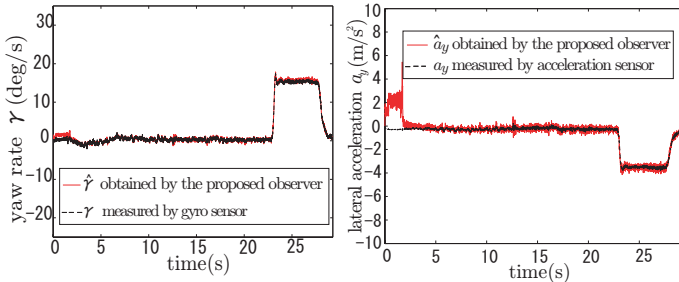
## 6. 東大三月号IIによる $\beta$ 推定の実験

**6.1 実験概要** 東大三月号IIは電気自動車の優位性を検証するために、日産マーチを元に作成した実験車両である。この車両は3方向の加速度センサ、ヨーレートを測定するためのジャイロセンサ、 $\beta$ を直接測定するための光学式非接触速度計を備えている(表1)。

表2に実験条件を示す。車両速度 $v$ 、実舵角 $\delta_f$ 、路面状態をそれぞれ変えて実験を行い、提案したオブザーバの正確性、ロバスト性について検証した。実験No.2では $\delta_f$ を大きくすることで非線形領域での $\beta$ 推定について検証した。また、路面状況が変化するとコーナリングパワーが変化するため、実験No.3ではコーナリングパワーの変化に対するロバスト性について検証することができる。乾燥路ではJターンを行い、湿潤路では定常円旋回を行った。実験No.4ではオブザーバゲインを式(23)とは異なる値に設定した線形オブザーバにより推定することで提案したオブザーバゲイン決定法の有効性について検証する。ロバスト性を検証



(a)  $\beta$  の測定値と推定値  
(a) measured value and estimation of  $\beta$



(b)  $\gamma$  の測定値と出力値  
(b) measured value and observer's output of  $\gamma$   
(c)  $a_y$  の測定値と出力値  
(c) measured value and observer's output of  $a_y$

図 5 実験 No.1 の結果 (40km/h、 $\delta_f=8$ [deg])

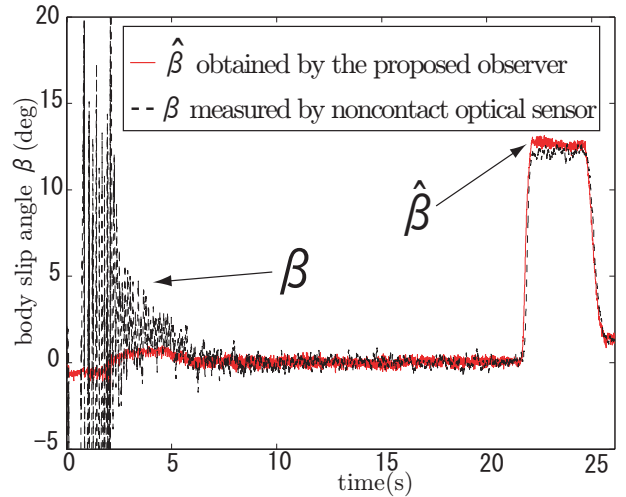
Fig. 5. No.1 exp. :  $v$  is 40km/h and  $\delta_f$  is 8[deg].

するために  $a_{11}$  に 30% のエラーを加えている。

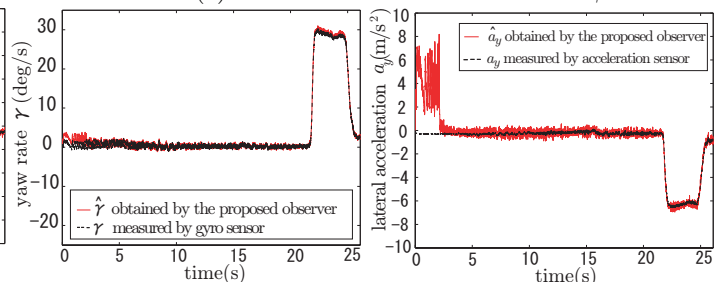
**6.2 実験結果** 図 5 ~ 8 にそれぞれ実験 No.1 ~ 4 の結果を示す。図 5 ~ 8 の (a) は測定された  $\beta$  と推定された  $\hat{\beta}$  の時系列であり、図 5 ~ 8 の (b) と (c) はそれぞれ測定された  $a_y$  と  $\gamma$ 、オブザーバにより出力された  $\hat{a}_y$  と  $\hat{\gamma}$  である。実験 No.1 では実舵角  $\delta_f$  が小さいので EV は線形領域にある。図 5 から、提案したオブザーバが線形領域で  $\beta$  を正確に推定していることが理解できる。また光学式非接触速度計による測定値が 0 ~ 5[s] で大きく振動している。これは低速域においては車両の速度に対して、車両の振動が無視できないことが原因である。これに対して推定値は、低速域でも振動することなく正確に推定できており、提案したオブザーバがセンサよりも信頼性が高いといえる。

図 6 は実験 No.2 の結果を示している。実験 No.2 では  $\delta_f$  が実験 No.1 の場合より大きいので  $\beta$  が大きくなり EV の運動が非線形領域に入っているが、提案したオブザーバにより非線形領域でも正確に  $\beta$  が推定できることがわかる。

図 7 に実験 No.3 の結果を示す。実験 No.3 では乾燥路から湿潤路に変えることで実際にコーナリングパワーの値は変化しているが、パラメータが一定の提案したオブザーバは  $\beta$  の推定に成功していることが理解できる。提案したオブザーバゲインの設計により線形オブザーバがコー



(a)  $\beta$  の測定値と推定値  
(a) measured value and estimation of  $\beta$



(b)  $\gamma$  の測定値と出力値  
(b) measured value and observer's output of  $\gamma$   
(c)  $a_y$  の測定値と出力値  
(c) measured value and observer's output of  $a_y$

図 6 実験 No.2 の結果 (40km/h、 $\delta_f=16$ [deg])

Fig. 6. No.2 exp. :  $v$  is 40km/h and  $\delta_f$  is 16[deg].

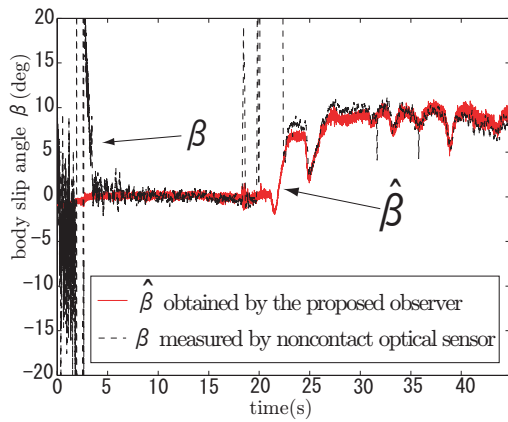
ナリングパワーの変動に対してロバストになっていることがわかる。また 20[s] 前後で測定値が発散しているが、これは実験路が湿潤路であるために光学式非接触速度計が誤動作を起こしていることが原因である。

図 8 に実験 No.4 の結果を示す。実験 No.4 では No.1 と同じ実験データを用いて、二つの異なるオブザーバゲインに設定した線形オブザーバにより推定を試みた。一つは提案したオブザーバ、もう一つはオブザーバゲインを式 (24) のように設定したものである<sup>(9)</sup>。式 (24) は式 (18) のようなパラメータ変動を補償する手法をとらず式 (17) を直接計算し、極配置法により求めたオブザーバゲインである。提案したオブザーバは  $\beta$  を正確に推定できているが、他方の線形オブザーバは定常誤差が生じ、正確に  $\beta$  が推定できていない。実験 No.4 より、提案したオブザーバゲインの設計法が、線形オブザーバをよりロバストにしていることがわかる。

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1(a_{12}+1)}{a_{11}} - 1 & \frac{a_{11}-\lambda_1}{va_{11}} \\ a_{22} - \frac{a_{21}(a_{12}+1)}{a_{11}} - \lambda_2 & \frac{a_{21}}{va_{11}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

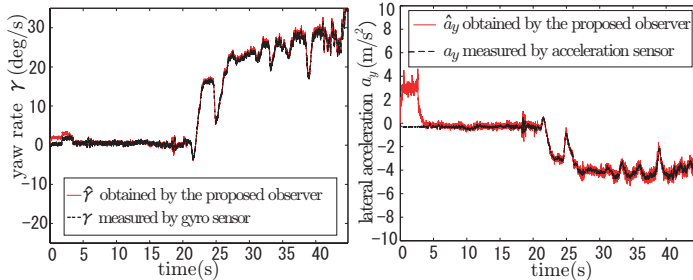
## 7. 結論

本研究では簡単な線形モデルを利用して、車体すべり角  $\beta$  を推定する線形オブザーバを提案した。さらにオブザーバゲインを定量的に解析することでモデルエラーにロバス



(a)  $\beta$  の測定値と推定値

(a) measured value and estimation of  $\beta$



(b)  $\gamma$  の測定値と出力値  
(b) measured value and observer's output of  $\gamma$

(c)  $a_y$  の測定値と出力値  
(c) measured value and observer's output of  $a_y$

図 7 実験 No.3: 湿潤路で円旋回した場合の結果

Fig. 7. No.3 exp.: EV draws a circle on wet road.

トな設計を試みた。またその有効性を検証するために東大三月号 II を用いた実験を行い、速度や実舵角が変化しても正確に推定できること、路面状態の変化に対してロバストであることが証明された。

序論でも述べたように EV の長所は、環境に優しいということだけではなく、内燃機関車より安全で高度な制御が可能であるということも重要な長所である。将来、EV はさらに普及していき、環境問題の解決に貢献していこう。本論文が EV の長所を最大限に活かすための一助となれば幸いである。

## 文 献

- (1) 坂井真一郎, 佐渡秀夫, 堀 洋一: 電気自動車における車体速度情報不要の新しいタイヤ空転検出法, 電気学会産業応用部門誌, Vol.120-D, No.2, pp.281-287, 2000.  
S. Sakai, H. Sado and Y. Hori: "Novel Wheel Skid Detection Method without Chassis Velocity for Electric Vehicle", *IEEJ Trans. IA*, Vol.120-D, No.2, pp.281-287, 2000. (in Japanese)
- (2) 安部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂, 1992.  
M. Abe: "Vehicle Dynamics and Control", Sankaido, 1992. (in Japanese)
- (3) 坂井真一郎, 佐渡秀夫, 堀 洋一: 4輪独立駆動電気自動車における動的な制駆動力配分法, 電気学会産業応用部門誌, Vol.120-D, No.6, pp.761-768, 2000.  
S. Sakai, H. Sado and Y. Hori: "Dynamic Driving/Braking Force Distribution in Electric Vehicle with Independently Driven Four Wheels", *IEEJ Trans. IA*, Vol.120-D, No.6, pp.761-768, 2000. (in Japanese)

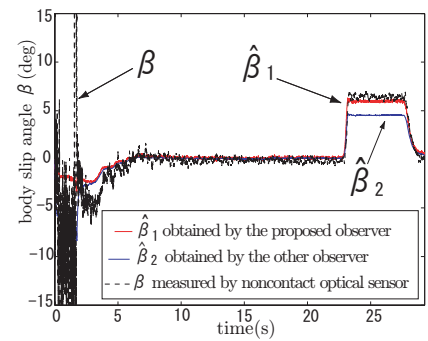


図 8 実験 No.4:  $a_{11}$  に 30% のエラーを含んだ場合の の二つのオブザーバによる推定値と測定値

Fig. 8. No.4 exp.: Measured value and estimation of  $\beta$  with two different gain matrixes when we add 30 percent error in  $a_{11}$  intentionally.

- (4) Masugi Kaminaga and Genpei Naito: "Vehicles Body Slip Angle Estimation Using an Adaptive Observer", *Proceedings of AVEC'98*, 1998.
- (5) Aleksander D. Rodic and Minmir K. Vukobratovic: "Contribution to the Integrated Control Synthesis of Road Vehicles", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.7, No.1, pp.64-78, 1999.
- (6) Laura R. Ray: "Nonlinear Tire Force Estimation and Road Friction Identification Simulation and Experiments", *Automatica*, Vol.33, No.10, pp.1819-1833, 1997.
- (7) Laura R. Ray: "Nonlinear State and Tire Force Estimation for Advanced Vehicle Control", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol.3, No.1, pp.117-124, 1995.
- (8) Fredrik Gustafsson: "Monitoring tire-road friction using the wheel slip", *IEEE Control Systems*, Vol.18, No.4, pp.42-49, 1998.
- (9) T. Inoue and Y. Hori: "Observer Design of Drift Angle for Future Vehicle Control and Experimental Evaluation using the Four-Motored Electric Vehicle", *EVS-20*, 2003.
- (10) Y. Hori and T. Umeno: "Implementation of Robust Flux Observer Based Field Orientation (FOFO) Controller for Induction Machines", 1989 *IAS Meeting*, pp.523-528, 1989.

青木 良文 (学生員) 1980 年生。2004 年 3 月 東京大学電気工学科卒業。2004 年同大学工学系研究科修士課程入学。主として電気自動車の二次元運動に関する研究に従事



堀 洋一 (正員) 1955 年生。1978 年東京大学工学部電気工学科卒業, 1983 年同大学院博士課程修了。助手, 講師, 助教授を経て, 2000 年 2 月より工学系研究科電気工学専攻教授。2002 年 10 月より東京大学生産技術研究所教授。専門は制御工学とその産業応用, とくに, モーションコントロール, メカトロニクス, 電気自動車などの分野への応用研究に従事。

