

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

青木 良文*, 堀 洋一 (東京大学)

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

Yoshifumi Aoki and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

Electric Vehicles (EVs) are inherently suitable for 2-Dimension control. To utilize EV's advantages, body slip angle β and yaw rate γ play an important role. However as sensors to measure β are very expensive, we need to estimate β from only variables to be measurable. In this paper, an improved estimation method for body slip angle β for EVs is proposed. This method is based on a linear observer from side acceleration a_y and γ sensors. We especially considered the design of gain matrix and we achieved succeeded in exact and robust estimation. We performed experiments by UOT MarchII (Fig. 1). This experimental vehicle was made for study of advanced control of EV to be driven by four in-wheel motors. 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 オブザーバゲイン

(Keywords: Electric Vehicle (EV), body slip angle β , yaw rate γ , side acceleration a_y , robust, linear observer, gain matrix)

1. 序 論

現在、電気自動車 (EV) は環境にいい事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。特にハイブリッド自動車をここ近年見かけるようになってきており、十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事は間違いない。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い。電気モータを駆動源にする事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。

- (1) トルク指令からトルク出力までの応答が高速で正確
- (2) 出力トルクの大きさが正確にわかる
- (3) モータの小型化が可能なので分散配置できる

1. モータのトルク応答速度は 10[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なる。

2. 出力トルクの大きさが正確にわかると、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。この事は、路面状態を考慮した、全く新しい制御が実現できる事を意味している。

3. モータの小型化、分散化により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 β 、ヨーレート γ の制御、つまりは自動車の高度な二次元制御が容易にできる。

本稿では EV の特徴を活かした二次元制御のための、線形オブザーバを用いた新しい β 推定の手法とオブザーバゲインの決定法について提案した。東大三月号 II による実験によりその有効性は実証されている。



図 1 東大三月号 II

Fig. 1 UOT MarchII

2. 電気自動車のモデル化

線形オブザーバを用いるにはまず車両のモデル化を行い、状態方程式で表現する必要がある。本研究では 2 輪モデル⁽²⁾ をオブザーバに用い、4 輪モデル (図 2) をシミュレーションモデルとして用いた。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、線形オブザーバには利用できない。線形オブザーバには線形方程式で表現できる 2 輪モデル (図 3) を使う。ここで 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、 α_f は前輪のスリップ角、 α_r は後輪のスリップ角、 δ_f はタイヤの実舵角である。

一般的に車両の状態方程式は β 、 γ 、 v などを使って表現す

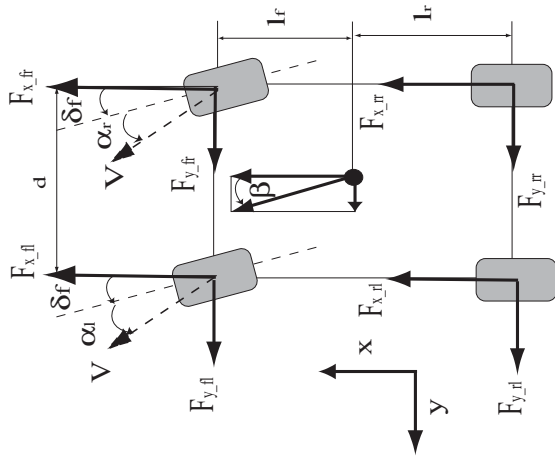


図2 車両の4輪モデル

Fig. 2 Four-wheel model of vehicle motion

る。車両の運動方程式は式 (1) ~ (3) のように表現される。

$$ma_x = F_{x_fl} + F_{x_fr} + F_{x_rl} + F_{x_rr} \dots\dots\dots (1)$$

$$ma_y = F_{y_fl} + F_{y_fr} + F_{y_rl} + F_{y_rr} \dots\dots\dots (2)$$

$$I\dot{\gamma} = l_f(F_{y_fl} + F_{y_fr}) - l_r(F_{y_rl} + F_{y_rr}) + N \dots\dots (3)$$

$$N = \frac{d}{2}(-F_{x_fl} + F_{x_fr} - F_{x_rl} + F_{x_rr})$$

ここで

F_{x_fr} : 右前輪の生み出す制駆動力

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

F_{y_fl} と F_{y_fr} は 2 輪モデルの線形領域において次のような線形方程式で表現できる。

$$F_{y_fl} = F_{y_fr} = \alpha_f C_f, \quad F_{y_rl} = F_{y_rr} = \alpha_r C_r \dots (4)$$

C_f , C_r はコーナリングパワー CP であり次の式で定義されている。

$$CP = \frac{\partial F_y}{\partial \alpha} |_{\alpha=0} \dots\dots\dots (5)$$

また、前後方向の加速度 a_x , 横加速度 a_y , γ , β , v には式 (6), (7) の関係が成り立つ。

$$a_x = -v(\dot{\beta} + \gamma) \sin \beta + \dot{v} \cos \beta \dots\dots\dots (6)$$

$$a_y = v(\dot{\beta} + \gamma) \cos \beta + \dot{v} \sin \beta \dots\dots\dots (7)$$

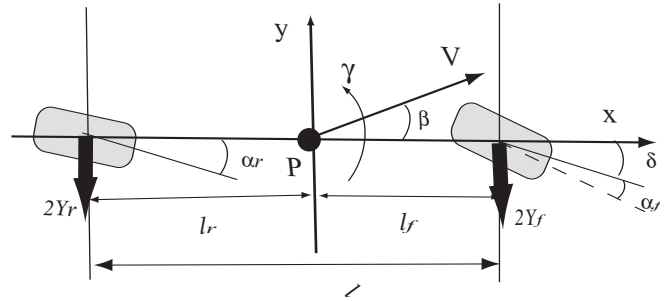


図3 車両の2輪モデル

Fig. 3 Two-wheel model of vehicle motion

式 (7) においてコーナリングパワーに対して $\dot{v} \cos \beta$ は非常に小さいので \dot{v} は 0 に近似できる。

$$a_y = v(\dot{\beta} + \gamma) \cos \beta \dots\dots\dots (8)$$

式 (1) ~ (8) より状態方程式 (2) が導かれる。

$$\dot{x} = Ax + B\delta_f \dots\dots\dots (9)$$

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

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{l_f} \\ \frac{2l_f C_f}{I} \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$$

3. 提案した線形オブザーバの導出

β を推定する手法は今まで様々な手法が提案されてきた。例えば式 (10) に基づいて β を推定する方法は、少ない計算量でリアルタイムに推定できる。しかし積分する必要があるため、誤差が蓄積し、正確に推定できないという欠点がある。非線形オブザーバによる推定法^{(4), (5), (6), (7)} はなるべく実車両に近いダイナミクスを持つ複雑なモデルを作る事により β などの車両に必要なパラメータを推定しようというものである。しかしそのモデルの複雑性のためリアルタイムに β を推定するには適していない。

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

これに対して線形オブザーバは簡単なモデルを用いているため、リアルタイムに推定を行う事ができるという長所がある。しかし今までの線形オブザーバはモデルエラーに対して弱く、車両が非線形領域に入ると β が正確に推定できない。

本稿ではこの短所を克服した、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オブザーバを構成するための信号として γ のみを利用してしたが、 γ に加えて横加速度を利用する事で非線形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。

オブザーバを設計するためには、測定できるパラメータで出

力方程式を再構成する必要がある。測定できるパラメータとして次のようなものが考えられる。

- 前後加速度 (a_x)
- 横加速度 (a_y)
- ヨーレート (γ)

a_x は線形方程式で表現できないため、 γ と a_y を出力方程式として内部変数 γ, β で再構成する。式 (8) と (2) を利用することで a_y は次のように再構成される。

$$a_y = v(a_{11}\beta + a_{12}\gamma + b_1\delta + \gamma) \dots\dots\dots (11)$$

以上より、出力方程式 (3) は導かれる。

$$y = Cx + D\delta_f \dots\dots\dots (12)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ va_{11} & v(a_{12} + 1) \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ vb_1 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} a_y \\ \gamma \end{bmatrix}$$

同一次元オブザーバ

本稿では線形オブザーバとして同一次元オブザーバを利用する。同一次元オブザーバは以下の式で定義される。

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - K(\hat{y} - y) \dots\dots\dots (13)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du \dots\dots\dots (14)$$

ここで K はオブザーバゲインである。

推定誤差 $e = \hat{\beta} - \beta$ は次のようになる。

$$\dot{e} = (A - KC)e \dots\dots\dots (15)$$

オブザーバゲイン K を変える事によって、オブザーバの性質を変える事ができる。オブザーバゲインの決め方がロバスト性を追求するために重要になる。

3.1 . オブザーバゲインの決定法

オブザーバゲインが適切な値に設定されていないと線形オブザーバはモデルエラーに対してロバストでなくなるばかりでなく、時には β が正確に推定できなくなる。線形オブザーバのゲイン K を決めるには、次の二つの事に注意しなければならない。

1つ目は、モデルエラーに対してロバストである事である。2輪モデルは線形モデルであるため、モデルエラーが必ず生じる。特にコーナリングパワーは路面状態と各タイヤにかかる荷重によってリアルタイムに変化するため同定が難しいため、コーナリングパワーに対してロバストである事が重要である。

2つ目は、 $A - KC$ の極が安定領域に存在する事である。 $A - KC$ は式 (15) の遷移行列である。 $A - KC$ の極配置はオーバーシュートや立ち上がり時間、整定時間といった時間応答に影響を与えるので重要である。

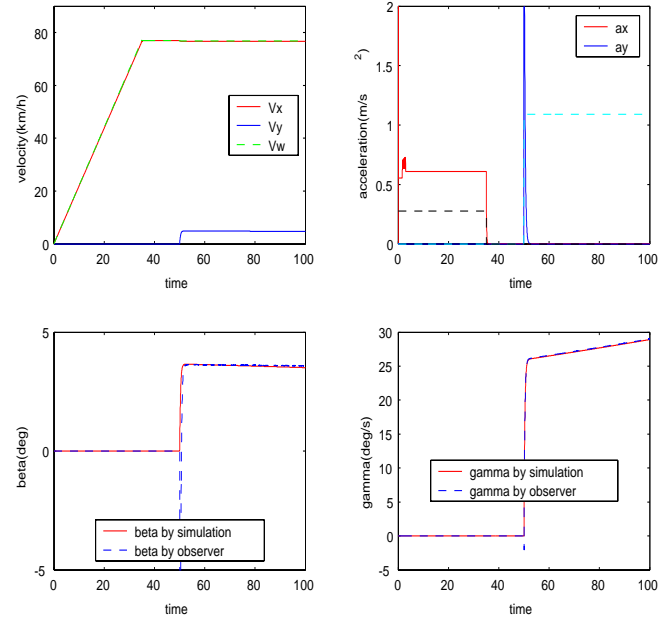


図4 シミュレーション結果

Fig. 4 Simulation result

以下、提案したオブザーバがもっともロバストである条件を求めていく。⁽⁹⁾

式 (11)、(14) を計算する事により $\hat{\beta}$ を得る:

$$\dot{\hat{\beta}} = a_{11}\hat{\beta} + a_{12}\hat{\gamma} + b_{11}\delta_f - k_{11}(\hat{\gamma} - \gamma) - k_{12}(a_y - a_y) \quad (16)$$

モデルエラーを全く含まない β の状態方程式は式 (17) のようになる。

$$\dot{\beta} = a'_{11}\beta + a'_{12}\gamma + b'_{11}\delta_f \quad (17)$$

a'_{11} , a'_{12} と b'_{11} はモデルエラーを含まない実際の値である。式 (16) と式 (17) により、 $\hat{\beta} - \beta$ の状態方程式は次のように計算される。

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\beta}} - \dot{\beta} = & (\hat{\beta} - \beta)(a_{11} - k_{12}v) - (1 - k_{12}v)(a'_{11} - a_{11})\beta \\ & + (\hat{\gamma} - \gamma)[a_{12} - k_{12}v(a_{12} + 1) - k_{11}] \\ & - (1 - k_{12}v)(a'_{12} - a_{12})\gamma \\ & + (1 - k_{12}v)(b_1 - b'_{11})\delta \quad \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

γ はジャイロセンサーにより測定できるため、 $\hat{\gamma}$ と γ は等しいとしてよい。よって提案したオブザーバがもっともロバストであるための条件式 (18) を得る。

$$1 - k_{12}v = 0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

式 (19) より k_{12} を得る。

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

Experimental No.	v [km/h]	δ [deg]	road type
1	40	90	dry
2	40	180	dry
3	EV was accelerated, and draws a circle with a radius of 26.5 meters in wet road		
4	In Experiment No.1, another observer gain with model error was used		

$$k_{12} = \frac{1}{v} \dots\dots\dots (20)$$

さらに極配置を考慮し、 K を次のように決定した。

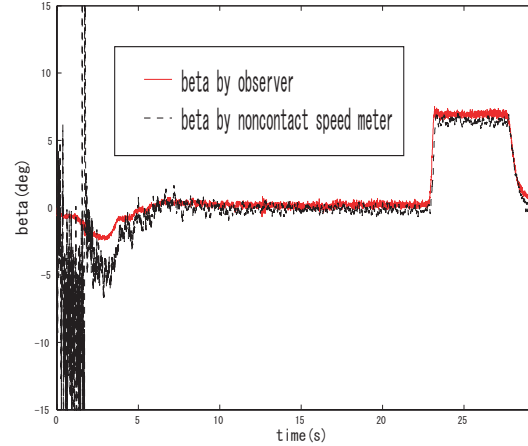
$$K = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{C_f} \frac{(lf-lr)I}{2(lf^2+lr^2)+4lflr} - 1 & \frac{1}{v} \\ -\lambda_1 - \lambda_2 & \frac{m(lf^2+lr^2)}{(lf-lr)I} \end{bmatrix} \dots\dots (21)$$

λ_1 と λ_2 はオブザーバの極である。

4. シミュレーションによる検証

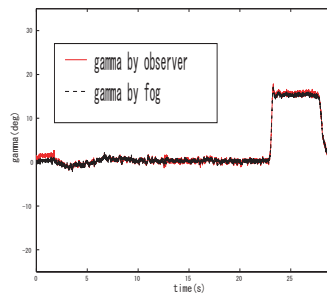
4.1 . シミュレーションの概要

車両による実験を行う前に、4輪モデルを用いてEVのシミュレーションを行い、提案したオブザーバの検証をした。シミュレーションの中では、以下のような状況にした。路面状況は乾いたアスファルトを想定、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]過ぎにトルクを0にし、50[s]過ぎには前輪の実舵角 δ_f を5[deg]の大きさに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。



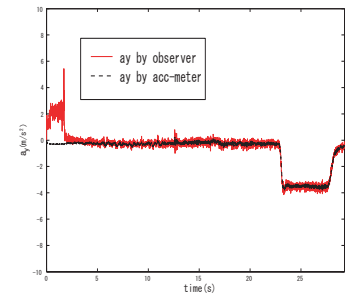
(a) β の測定値と推定値

(a)Measured value and estimation of β



(b) γ の測定値と出力値

(b)Measured value and observer's output of γ



(c) a_y の測定値と出力値

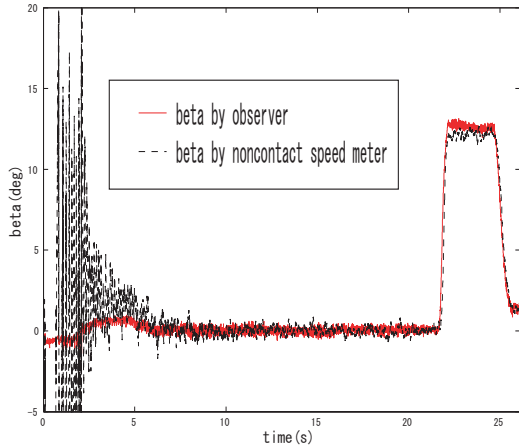
(c)Measured value and observer's output of a_y

図 5 40km/h, δ 90 度で右旋回した場合の結果

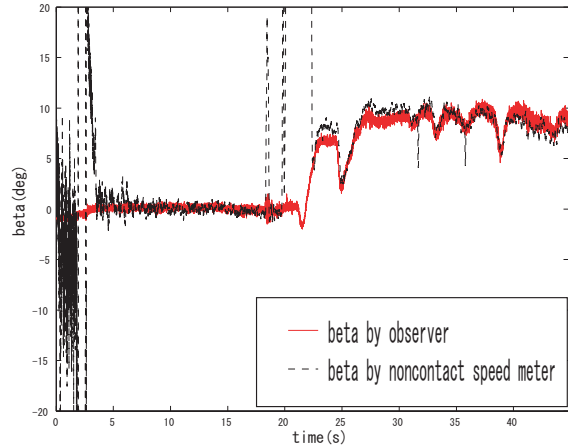
Fig. 5 No.1 experiment Speed is 40km/h and steering angle δ is 90[deg]

4.2 . シミュレーション結果

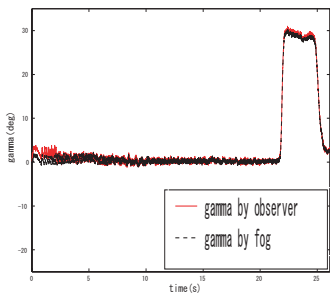
図 4 がシミュレーション結果である。 β が正しく推定できていることがわかる。立ち上がり時間は充分短く、オーバーシュートも生じていないので、オブザーバゲインの決定の仕方が適当であると言える。 δ_f がステップ上に入力された時に逆応答が生じている。これはオブザーバゲイン K に $\frac{1}{v}$ が含まれており、ゼロ割に近い現象が生じているためだと考えられる。この現象は β に制限を付ける事で解決できる。



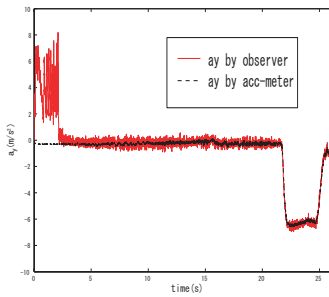
(a) β の測定値と推定値
 (a) Measured value and estimation of β



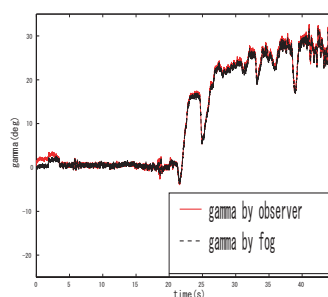
(a) β の測定値と推定値
 (a) Measured value and estimation of β



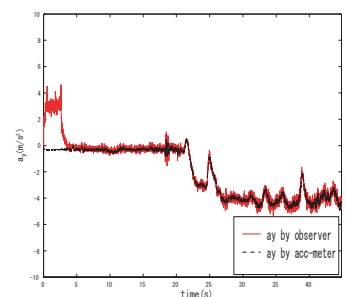
(b) γ の測定値と出力値
 (b) Measured value and observer's output of γ



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



(b) γ の測定値と出力値
 (b) Measured value and observer's output of γ



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

図 6 40km/h, δ 180 度で右旋回した場合の結果

Fig. 6 No.2 experiment Speed is 40km/h and steering angle δ is 180[deg]

図 7 wet 路で円旋回した場合の結果

Fig. 7 No.3 experiment EV was rotated in circle on the wet road

5. 東大三月号 II による β 推定の実験

5.1 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。この車両は加速度センサ、ヨーレート測定のためのジャイロセンサ、 β を測定するための光学式非接触速度計を備えており (表 1)、これにより提案したオブザーバの有効性について検証できる。

表 2 に今回行った実験条件を示す。車両速度 v 、ステアリングアングル δ 、路面状態を変えて実験を行う事で提案したオブ

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 δ を大きくすると β が非線形領域に入る。非線形領域での β 推定について検証する。路面状況が変化するとコーナリングパワーが変化する。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。乾燥路では J ターンを行い、wet 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 (21) とは異なる値に設定した線形オブザーバと比較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。ロバスト性を検証するために a_{11} に 30 % のエラーを加えている。

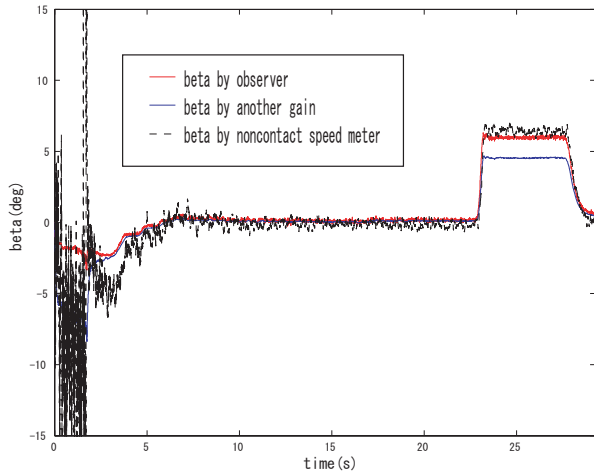


図8 a_{11} に 30% のエラーを含んだ場合の横すべり角の二つのオブザーバによる推定値と測定値
 Fig. 8 No.4; Measured value and estimation of β with two different gain matrixes; Speed is 40km/h and steering angle δ is 90[deg]

5.2 提案したオブザーバの検証

図5～8はそれぞれ実験No.1～4の結果である。図5～8(a)は測定された β と推定された β のグラフであり、図5～8(b)と(c)はそれぞれ測定された a_y と γ 、出力された a_y と γ である。

実験No.1ではステアリングアングル δ 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 β が正確に推定できることを示している。

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

図7は実験No.3の結果である。実験No.3では乾燥路からwet路に変えることで実際のコーナリングパワーを変えた。提案したオブザーバのパラメータは一定にしているのに対して、実際のコーナリングパワーの値は変化している。No.3の実験結果より提案したオブザーバが、コーナリングパワーの変動に対してロバストであることが証明された。

図8は実験No.4の結果を表している。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(22)のように設定したものである。提案したオブザーバは β 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 β

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。

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

6. 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 β 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新しい線形オブザーバを提案した。またその有効性を検証するために東大三月号IIを用いた実験により速度、ステアリングアングルが変化しても正確に推定できることと、推定路面状態が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の長所というのは、環境に優しいということだけではない。内燃機関車より安全で高度な制御が可能だということも重要な長所である。将来、pure 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。EVの長所を最大限に活かすための研究は、欠かせない課題なのである。

文 献

- (1) Yoichi Hori: "Future Vehicle driven by Electricity and Control -Research on 4 Wheel Motored 'UOT March II'", AMC 2002, pp.1-14, 2002.
- (2) Shinichiro 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.
- (3) Masugi Kaminaga and Genpei Naito: "Vehicles Body Slip Angle Estimation Using an Adaptive Observer", *Proceedings of AVEC'98*, 1998.
- (4) 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, 1999.
- (5) Laura R. Ray: "Nonlinear Tire Force Estimation and Road Friction Identification Simulation and Experiments" *Automatica*, Vol.33, No.10, pp.1819-1833, 1997.
- (6) Laura R. Ray: "Nonlinear State and Tire Force Estimation for Advanced Vehicle Control", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.3, No.1, pp.117-124, 1995.
- (7) Fredrik Gustafsson: "Monitoring Tire-Road Friction Using The Wheel Slip", *IEEE Control Systems*, pp.42-49, 1998.
- (8) Tomoko Inoue and Yoichi Hori: "Observer Design of Body Angle β for Future Vehicle Control and Experimental Evaluation using the Four-Motored Electric Vehicles", *EVS - 20*, 2003.
- (9) Yoichi Hori and Takaji Umeno: "Implementation of Robust Flux Observer Based Field Orientation (FOFO) Controller for Induction Machines" 1989 *IAS Annual Meeting*, pp.523-528, 1989.