

- 卒業論文 -

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

平成16年2月10日提出

指導教官: 堀 洋一 教授

東京大学工学部電気工学科

20324 青木 良文

## 内容梗概

本論文では、電気自動車における車体すべり角 $\beta$ の推定を目的とし、その推定手法と、推定器のロバスト化の手法を提案する。

$\beta$ とは、車体の横方向と縦方向の速度のなす角度のことである。タイヤがグリップを失うと、 $\beta$ は大きくなり、車両はスピンやドリフトアウトを起こして大事故を起こしてしまう可能性がある。したがって $\beta$ を測定し、制御することは車両の横方向の安全に貢献することになる。

しかしまず $\beta$ を測定するために、高額なセンサが必要であるため推定する必要があるが、その手法は複雑であるためにリアルタイムでの推定に使えない、モデルエラーに弱い、非線形領域で推定できないなどの問題がある。

本論文では、上記の問題を解決した、新しい推定方法を提案する。まずはヨーレートと横加速度をオブザーバの出力として用いた線形オブザーバを構成する。次に理論的にオブザーバゲインを計算することによりロバストでありかつ非線形領域でも正確に $\beta$ が推定できるオブザーバを提案する。

シミュレーションと実際の電気自動車を用いて実験を行うことで提案したオブザーバの有効性を実証する。

# 目次

第1章	序論	2
1.1	電気自動車 (EV) の現状と優位点	2
1.2	研究の目的	2
1.3	$\beta$ 推定と制御の必要性	3
第2章	車体すべり角 $\beta$ 推定のための自動車の運動方程式	4
2.1	二次元運動を表現するための4輪モデル	4
2.2	線形方程式にするための2輪モデルへの近似	7
第3章	車体すべり角 $\beta$ の推定方法	9
3.1	最近の研究動向	9
3.1.1	直接積分法による推定法	9
3.1.2	オブザーバによる推定法	9
3.2	横加速度を用いた線形オブザーバの提案	10
3.2.1	オブザーバの構成	10
3.2.2	ロバスト性を追求するためのオブザーバゲインの決定方法	11
第4章	シミュレーションによる提案したオブザーバの検証	13
4.1	シミュレーションの概要	13
4.2	シミュレーション結果	13
4.3	モデルエラーに対する検証のためのシミュレーション	14
4.4	シミュレーションに対する考察	14
第5章	東大三月号 II を用いたオブザーバの検証	16
5.1	オブザーバの有効性を証明するための実験方法とその目的	16
5.2	乾燥路とウェット路での実験結果	18
5.3	実験に対する考察	24
5.4	オブザーバゲインに対する検証-提案したオブザーバゲインの妥当性-	24
第6章	結論	26
6.1	本論文のまとめ	26
6.2	今後の課題	26
	参考文献	27

# 第1章 序論

## 1.1 電気自動車 (EV) の現状と優位点

市場には、ハイブリッド自動車、EV が販売されるようになってきている。現在、特にエンジンと電気モータを併用するハイブリッド自動車が急速に増えており、高効率化、CO<sub>2</sub> 低減に成功している。しかしハイブリッド自動車よりもさらにクリーンで高効率である EV が、世の中ではあまり見られない。電気自動車が普及していない理由として、充電時間の長さ、高性能電池の価格が高い、インフラが普及していないことがあげられる。そのため、主な電気自動車の研究は一充電での走行距離を延ばす研究や、燃料電池、電気二重層キャパシタの利用といった電源の開発研究が中心となっている。しかし電気自動車の特徴はクリーン、高効率だけではない。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。[1]

1. トルク指令からトルク出力までの応答が高速で正確である
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。このことは、路面状態を考慮した、全く新しい制御が実現できることを意味している。

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  $\beta$ 、ヨーレート  $\gamma$  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  $\beta$  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。

以上のような特徴を活かす研究を当研究室では進めている。 $\beta$  制御もその研究の一種である。

## 1.2 研究の目的

非線形要素を含んだ車両運動を、簡単な線形運動方程式を使ってモデルエラーにロバストな  $\beta$  を推定し、さらに推定された  $\beta$  を使って車体運動を制御することである。今までに、

車体重心周りの回転角速度ヨーレート  $\gamma$  を用いる手法があったが、測定誤差を含み、推定に成功しているとはいえない。本研究ではヨーレート  $\gamma$  に加え、車体の横加速度  $a_y$  を用いることで非線形領域まで正確に  $\beta$  を推定できるオブザーバを提案する。今年に入り、初めて正確な  $\beta$  を測定できる装置が東大三月号 II に装備できたため、推定された  $\beta$  の検証を実験により示したい。

### 1.3 $\beta$ 推定と制御の必要性

$\beta$  は車体の方向と車体速度のなす方向の角度である。一般に滑りやすい路面などでタイヤ-路面間の粘着が失われると  $\beta$  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り大事故につながる可能性がある。ゆえに補償ヨーモーメントなどで  $\beta$  を制御することは、車体運動を安定に行う上で必要となってくる。また、現在具体的に開発、実用化されている自動車の制御方法としては ABS, TRC, VSC などがあり、高度な制御技術が研究されるにつれて、車両の様々な信号を測定する必要性が出てきた。そのような信号の中で今注目されているのが、ヨーレート  $\gamma$  と車体滑り角  $\beta$  である。 $\gamma$  は車体重心の回転速度であり、ジャイロセンサで簡単に測定できる。これに対し測定するには高価な対地センサが必要となるため、推定する必要性が出てくるのである。

## 第2章 車体すべり角 $\beta$ 推定のための自動車の運動方程式

### 2.1 二次元運動を表現するための4輪モデル

本章ではまず、車両の二次元運動を扱う際に必要となる運動方程式について述べる。この章では、車両の厳密なモデルである4輪モデルについて説明をし、次の章でオブサーバに利用する簡略化された2輪モデル [2] を紹介する。

4輪モデルはシミュレーションモデルとしてのみ利用することにする。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、線形オブサーバには利用できない。2輪モデル [2] は線形方程式で表現できるので線形オブサーバに利用可能なのである。

図 2.1 を参考にして車両の運動方程式をそれぞれ前後方向、横方向、そして平面内での回転方向に関して立てると次のようになる。

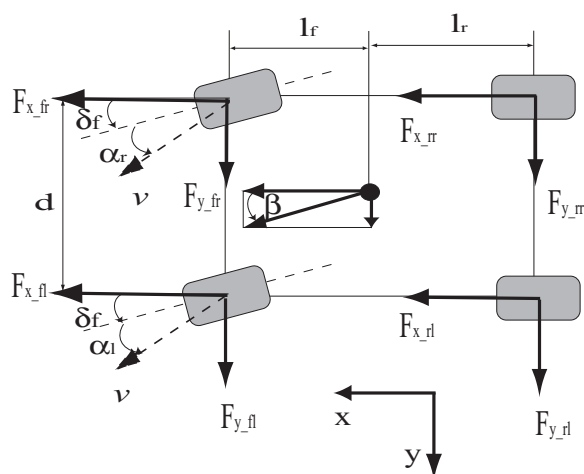


図 2.1: 車両運動方程式と座標系

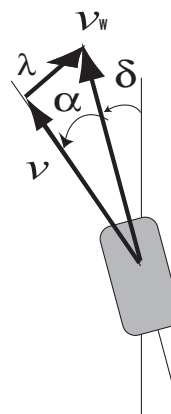


図 2.2:  $\lambda$  - Method

$$m\dot{v}_x = F_{x-fl} + F_{x-fr} + F_{x-rl} + F_{x-rr} \quad (2.1)$$

$$m\dot{v}_y = F_{y-fl} + F_{y-fr} + F_{y-rl} + F_{y-rr} \quad (2.2)$$

$$I\dot{\gamma} = l_f(F_{y-fl} + F_{y-fr}) - l_r(F_{x-rl} + F_{x-rr}) + N \quad (2.3)$$

$$N = \frac{d}{2}(-F_{x-fl} + F_{x-fr} - F_{x-rl} + F_{x-rr})$$

ただし、

$m$  : 車両質量、 $I$  : 車両の慣性モーメント、 $v$  : 車速、 $v_w$  : 車輪速

## 2.1 二次元運動を表現するための4輪モデル

---

$\gamma$  : 車両のZ軸まわりの角速度 (ヨーレート)

$\beta$  : 車両の姿勢方向と進行方向のなす角 (車両横すべり角)

$N$  : 左右輪の制駆動力差によるZ軸まわりのヨーモーメント力

$F_{y-fl}, F_{y-fr}, F_{y-rl}, F_{y-rr}$  : 各車輪で発生する横力

$F_{x-fl}, F_{x-fr}, F_{x-rl}, F_{x-rr}$  : 各車輪で発生する制駆動力

$l_f, l_r$  : 車両重心点と前後輪車軸までの距離、 $d$  : 左右のタイヤの間の距離

ここで  $F_{y-fl}, F_{y-fr}, F_{y-rl}, F_{y-rr}, F_{x-fl}, F_{x-fr}, F_{x-rl}, F_{x-rr}$  は次の  $\lambda$ -Method [3] により求めることになる。

### $\lambda$ - Method

$\lambda$  - Method は2次元運動の際にタイヤから出る制駆動力と横力を計算する手法の一つであり、 $\lambda$  は式 (2.4) で定義され、図 2.2 のようになる。

$$\vec{\lambda} = \frac{\vec{v}_w - \vec{v}}{\max(|v_w|, |v|)} \quad (2.4)$$

$\lambda$  を利用するとタイヤにかかる力  $\vec{F}$  は式 (2.5) のようになる。

$$\vec{F} = \mu(|\lambda|) F_z \frac{\vec{\lambda}}{|\lambda|} \quad (2.5)$$

ただし  $\mu$  は Magic-Formula の式 (2.6) を用いて計算した。

$$\mu(\lambda) = D \sin \left( C \tan^{-1} B \left( (1 - E)\lambda + \frac{E}{B} \tan^{-1} B\lambda \right) \right) \quad (2.6)$$

B, C, D, E を変えることで色々な路面状態を実現できるようになる。 $F_z$  は各タイヤにかかる垂直抗力で式 (2.7) ~ (2.10) のようになる。

$$F_{z\_fr} = \frac{m}{2(l_f + l_r)} (l_r g - h a_x) + \frac{h}{d} m a_y \quad (2.7)$$

$$F_{z\_fl} = \frac{m}{2(l_f + l_r)} (l_r g - h a_x) - \frac{h}{d} m a_y \quad (2.8)$$

$$F_{z\_rr} = \frac{m}{2(l_f + l_r)} (l_r g + h a_x) + \frac{h}{d} m a_y \quad (2.9)$$

$$F_{z\_rl} = \frac{m}{2(l_f + l_r)} (l_r g + h a_x) - \frac{h}{d} m a_y \quad (2.10)$$

ただし、

$F_{z\_fl}, F_{z\_fr}, F_{z\_rl}, F_{z\_rr}$ : 各輪にかかる垂直抗力  
 $g$ : 重力加速度、 $h$ : 地面から重心までの高さ  
 $a_x, a_y$ : 前後、左右の加速度

である。

また各タイヤの滑り角は式 (2.11) ~ (2.14) のように表せることができる。以上より、制駆動力と横力を求めるブロック線図は図 2.3 のようになる。[4]

$$\alpha_{fr} = \frac{v\beta + l_f\gamma}{v - d_f\gamma/2} \quad (2.11)$$

$$\alpha_{fl} = \frac{v\beta + l_f\gamma}{v + d_f\gamma/2} \quad (2.12)$$

$$\alpha_{rr} = \frac{v\beta - l_r\gamma}{v - d_r\gamma/2} \quad (2.13)$$

$$\alpha_{rl} = \frac{v\beta - l_r\gamma}{v + d_r\gamma/2} \quad (2.14)$$

このような4輪モデルはシミュレーションモデルとしては利用されるが、非線形方程式となってしまうため、線形オブザーバには利用できない。よって次に線形方程式を得るために2輪モデルに近似する。[5]



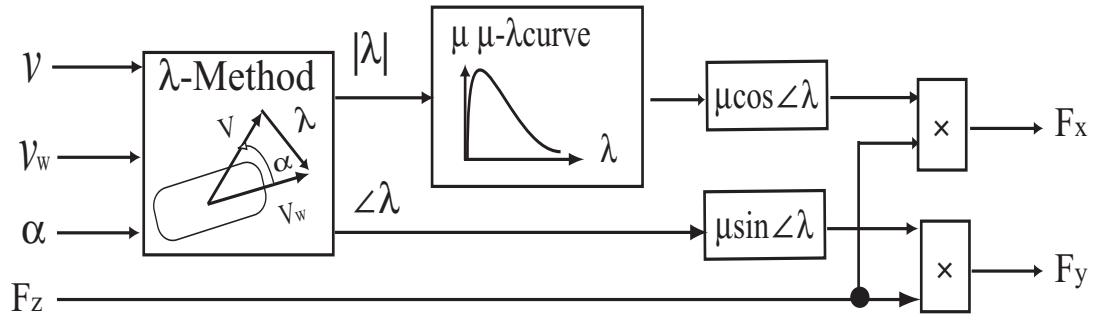


図 2.3: 制駆動力と横力の計算手順

## 2.2 線形方程式にするための2輪モデルへの近似

2輪モデルは図 2.4 のようになる。ただし  $F_{y-rr}$ 、 $F_{y-fr}$  : 前後輪のコーナリングフォースである。

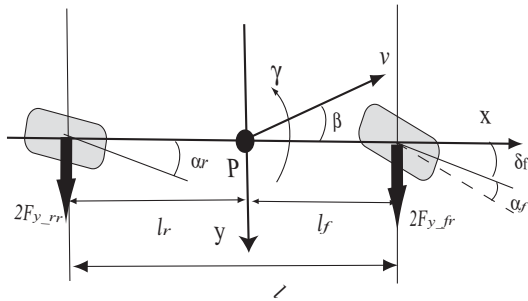


図 2.4: 4輪車の等価的な2輪車モデル

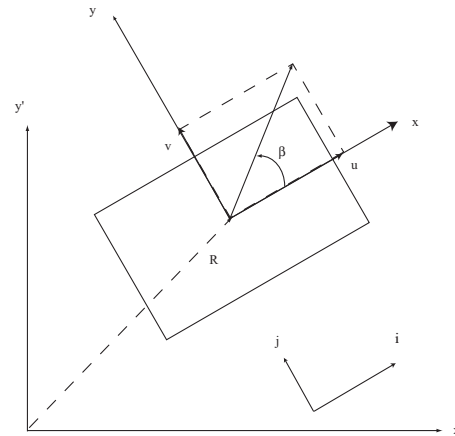


図 2.5: 車両運動の表現

ここで、運動方程式としては、式 (2.1) ~ (2.3) を使えばよいはずであるが、一般的に2輪モデルを扱う際には  $v, \beta, \gamma$  を使って状態を表すのが普通である。

一般に車両運動は平面上における回転を伴うので、車両に固定した座標系では慣性系とは異なる運動方程式に従って車両が運動する。この運動は位置に依存しないので、速度  $v$  による運動方程式になる。

図 2.5 のように車体に固定された方向ベクトルを  $i, j$ 、速度  $v$  の  $i, j$  方向正射影をそれぞれ  $u, v$  とおき、慣性系 (地上固定座標) での位置を  $R$  とすると  $v, \beta, \gamma, \dot{\beta}$  により式 (2.15)(2.16) のようになる。

$$\dot{\mathbf{R}} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} \tag{2.15}$$

$$\ddot{\mathbf{R}} = \dot{u}\mathbf{i} + u\frac{d}{dt}\mathbf{i} + \dot{v}\mathbf{j} + v\frac{d}{dt}\mathbf{j} \tag{2.16}$$

ここでヨーレートに関して

$$\frac{d}{dt}\mathbf{i} = \gamma\mathbf{j} \qquad \frac{d}{dt}\mathbf{j} = -\gamma\mathbf{i} \qquad (2.17)$$

という式が成立するので式 (2.16) は次のようになる

$$a_x = -v(\dot{\beta} + \gamma) \sin \beta + \dot{v} \cos \beta \qquad (2.18)$$

$$a_y = v(\dot{\beta} + \gamma) \cos \beta + \dot{v} \sin \beta \qquad (2.19)$$

コーナリングパワーと比べて  $\dot{v}$  は極小さいので式 (2.19) において  $\dot{v} = 0$  と近似できる。

$$a_y = v(\dot{\beta} + \gamma) \cos \beta \qquad (2.20)$$

さらに式 (3.9) において

$$F_{y-fl} = F_{y-fr} = \alpha_f C_f \qquad F_{y-rl} = F_{y-rr} = \alpha_r C_r \qquad (2.21)$$

ただし  $C_f, C_r$ : 前後輪のコーナリングパワー  
と近似して、式 (2.11) ~ (2.14) で  $d=0$  としたものを使うと次の状態方程式が導かれる。 [6]

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + B\delta_f \qquad (2.22)$$

$$(2.23)$$

ただし、

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

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{mv} \\ \frac{2l_f C_f}{I} \end{bmatrix}$$

以上より車両の2次元運動を線形化し、状態方程式にまとめることができた。

# 第3章 車体すべり角 $\beta$ の推定方法

## 3.1 最近の研究動向

### 3.1.1 直接積分法による推定法

直接積分による推定法とは $\beta$ を式(3.1)から求めるものである。[7]

$$v(\dot{\beta} + \gamma) = a_y \quad (3.1)$$

この方法の長所としては式(3.1)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)に影響されないので、摩擦係数 $\mu$ の変化にロバストになる。

しかし推定値の正確さが $a_y, \gamma$ の値のみ起因してしまうため、結局高性能センサがないと $\beta$ が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うという欠点を持つ。

以上の理由から直接積分による推定法は実用的でない。

### 3.1.2 オブザーバによる推定法

オブザーバの長所としてあげられるのが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。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、どの信号が測定可能かどうかによりオブザーバの良し悪しも変わってくる。オブザーバには線形オブザーバと非線形オブザーバの二つがある。

線形オブザーバで一般的に測定可能とされている信号が $\gamma, \delta, v$ であるが、この三つの測定値だけではオブザーバであってもモデルエラーが過大であるため、正確に $\beta$ が推定できないことがわかっている。

非線形オブザーバはノミナル化の際にモデルエラーをなるべくなくすために線形化を行わずに実際の車両に近いモデルでカルマンフィルタ等で推定する方法である。[8]、[9]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中には必要でないパラメータがあったり、モデルが複雑すぎたり、計算時間がかかるなどの欠点もあり、必ずしも非線形オブザーバがよいとは言えない。

また直接積分での推定法とオブザーバでの推定法との複合法があるが、アルゴリズムが複雑でモデルの正確さも要求される。

## 3.2 横加速度を用いた線形オブザーバの提案

前述したように直接積分法による推定も、現状のオブザーバによる推定法にも長短があり、良いとはいえない。直接積分法とオブザーバによる推定法もその複雑さゆえに必ずしもよいとはいえない。

今回提案するオブザーバは横加速度を用いて、オブザーバゲインを的確に定めることで、線形オブザーバであってもロバストかつ正確に推定できるオブザーバである。[10]

さらに提案したオブザーバは線形オブザーバでありながら、非線形領域での推定が可能である点でも優れている。

### 3.2.1 オブザーバの構成

オブザーバを構成するには測定できるパラメータで再構成する必要がある。

測定可能なパラメータは

- 前後方向の加速度
- 横方向の加速度
- ヨーレート

である。ここで前後方向の加速度を求めるには、前後方向の運動方程式を考えなければならないが、線形的な方程式にならないためにここでは使えない。よって  $\gamma, a_y$  を使って再構成する。再構成するには、 $a_y$  を  $\beta, \gamma$  を使って表す必要があるので式 (2.20), (2.23) を使うと

$$a_y = v(a_{11}\beta + a_{12}\gamma + b_1\delta + \gamma) \quad (3.2)$$

よって出力の方程式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ a_y \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \end{bmatrix} + D\delta_f \quad (3.3)$$

ただし、

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

以上より、状態方程式と出力方程式をまとめると次のようになる。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.4)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.5)$$

ただし

$$x = \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} \gamma \\ a_y \end{bmatrix}$$

### 同一次元オブザーバ [11]

線形オブザーバには最小次元オブザーバと同一次元オブザーバがあるが、ここでは同一次元オブザーバにより構成することにする。同一次元オブザーバは式 (3.6),(3.7) で表現される。

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - K(\hat{y} - y) \quad (3.6)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du \quad (3.7)$$

ただし  $K$ ; オブザーバゲインである。オブザーバの推定誤差は式 (3.8) のようになる。

$$\dot{e} = (A - KC)e \quad \text{ただし } e = \hat{\beta} - \beta \quad (3.8)$$

オブザーバゲイン  $K$  を変えることでオブザーバの性質が変化するので、ゲインの決め方が問題となってくる。

### 3.2.2 ロバスト性を追求するためのオブザーバゲインの決定方法

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  $\beta$  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、次の二つのこと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ことである。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ことが重要である。

2つ目は、 $A - KC$  の極が安定領域に存在することである ( $A - KC$  は式 (3.8) の遷移行列)。  $A - KC$  の極配置はオーバーシュートや立ち上がり時間、整定時間といったオブザーバの時間応答に影響を与えるので重要である。

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。 [12]

オブザーバゲインの計算

式 (2.23) から  $\dot{\hat{\beta}}$  を求めると

$$\dot{\hat{\beta}} = a_{11}\dot{\beta} + a_{12}\dot{\hat{\gamma}} + b_1\dot{u} - k_{11}(\hat{\gamma} - \gamma) - k_{12}(\hat{a}_y - a_y) \quad (3.9)$$

また実際の、モデルエラーを含まない  $\beta$  の状態方程式は次のように定義できる。

$$\dot{\beta} = a'_{11}\beta + a'_{12}\gamma + b'_1\dot{u} \quad (3.10)$$

式 (3.9)、(3.10) より、 $\dot{\hat{\beta}} - \dot{\beta}$  を計算すると式 (3.11) のようになる。

ただし  $\hat{a}, \hat{b}$  はノミナル誤差を含まない実際の値とする。

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\beta}} - \dot{\beta} &= (\hat{\beta} - \beta)(a_{11} - k_{12}v) - (1 - k_{12}v)(a'_{11} - a_{11})\beta \\ &\quad + (\hat{\gamma} - \gamma)[a_{12} - k_{12}v(a_{12} + 1) - k_{11}] \\ &\quad - (1 - k_{12}v)(a'_{12} - a_{12})\gamma \\ &\quad + (1 - k_{12}v)(b_1 - b'_1)\delta \end{aligned} \quad (3.11)$$

### 3.2 横加速度を用いた線形オブザーバの提案

---

以上より、 $\gamma$  が観測可能 ( $\hat{\gamma} = \gamma$ ) であるとする、 $\beta$  がモデルエラーに対してもっともロバストであるための条件は式 (3.12) のようになる。

$$1 - k_{12}v = 0 \quad (3.12)$$

よって

$$k_{12} = \frac{1}{v} \quad (3.13)$$

となる。また極配置などを考慮するとオブザーバゲイン  $K$  は次のように決定される。

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{C_f} \frac{(lf-lr)I}{2(lf^2+lr^2)+4lflr} - 1 & \frac{1}{v} \\ -\lambda_1 - \lambda_2 & \frac{m(lf^2+lr^2)}{(lf-lr)I} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

ただし  $\lambda_1, \lambda_2$  はオブザーバの極である。

# 第4章 シミュレーションによる提案した オブザーバの検証

## 4.1 シミュレーションの概要

東大三月号 II を用いて実験を行う前に,4 輪モデルをシミュレーションモデルとして,シミュレーションを行い,提案したオブザーバについて検証する。走行する路面はアスファルトを想定し,トルク、実舵角は次のように変化させる。シミュレーション時間は 100[s] である。

- 0 ~ 35[s]torque\_f,torque\_r=556[N],delta=0[deg]
- 35 ~ 60[s]torque\_f,torque\_r=0[N],delta=0[deg]
- 60 ~ 100[s]torque\_f,torque\_r=0[N],delta=5[deg]

シミュレーションのパラメータは次の通りである。

$m=1545[\text{kg}]$ ; 車重  
 $j=37[\text{kgm}^2]$ ; 車輪の慣性モーメント  
 $r=0.26[\text{m}]$ ; タイヤ半径  
 $mw=j/r/r[\text{kg}]$ ; 車輪重  
 $I=4800[\text{kgm}^2]$ ; 自動車のイナーシャ  
 $lf=1.1[\text{m}]$ ; フロントから重心までの距離  
 $lr=1.3[\text{m}]$ ; リアから重心までの距離  
 $l\_datron=1[\text{m}]$ ; フロントからダトロンまでの距離  
 $h=1[\text{m}]$ ; 重心の地面からの距離  
 $cf=3000[\text{kgm/s}^2/\text{rad}]$ ; 前輪のコーナリングフォース  
 $cr=3000[\text{kgm/s}^2/\text{rad}]$ ; 後輪のコーナリングフォース  
 $\lambda_1=-100$  ; オブザーバの極 1  
 $\lambda_2=-120$  ; オブザーバの極 2

## 4.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果は次の図 4.1,4.2 のようになった。beta by observer,gamma by observer が推定値である。短時間で実際の  $\beta$  の値に追従しており、推定に成功していることがわかる。

### 4.3 モデルエラーに対する検証のためのシミュレーション

モデルエラーに対する検証をするため、一番モデルエラーを含みやすいコーナリングパワーの値を 100,1000,3000,10000 と変化させて同様にシミュレーションを行った。

その結果、図 4.3 ~ 4.6 のようなグラフが得られた。

### 4.4 シミュレーションに対する考察

以上のシミュレーションの結果から、コーナリングパワーに対して十分ロバストで、かつ短時間で正確に推定できるオブザーバを提案できたといえる。ただハンドルを切っている 50[s] においてすべてのシミュレーションにおいて  $\beta$  が一次的に発散している。この原因は 0 割りに近い現象が生じていることだが、 $\beta$  の値に上限値と下限値を定めれば解決できる問題である。

ただし以上のシミュレーション結果だけでは、 $\beta$  が小さく非線形領域に入った時に推定できるといえるとは言えない。よって非線形領域に対する検証は実際に東大三月号 II を用いての実験で行う。



#### 4.4 シミュレーションに対する考察

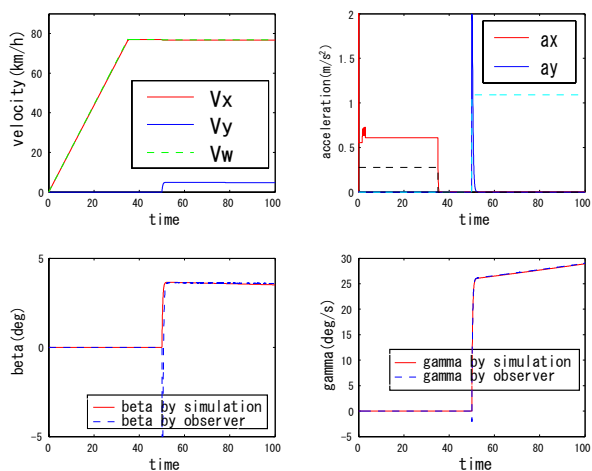


図 4.1: simulation 結果

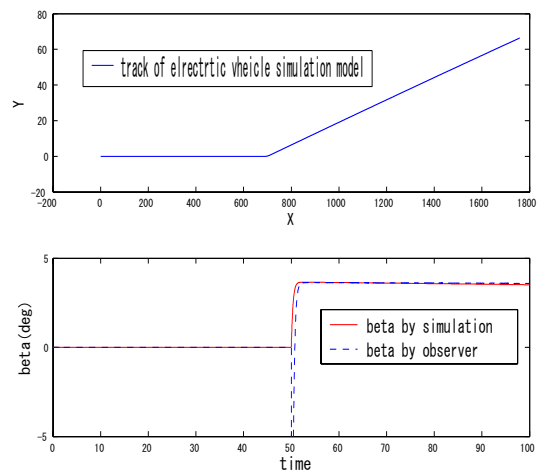


図 4.2: EV の軌跡と  $\beta$  の拡大図

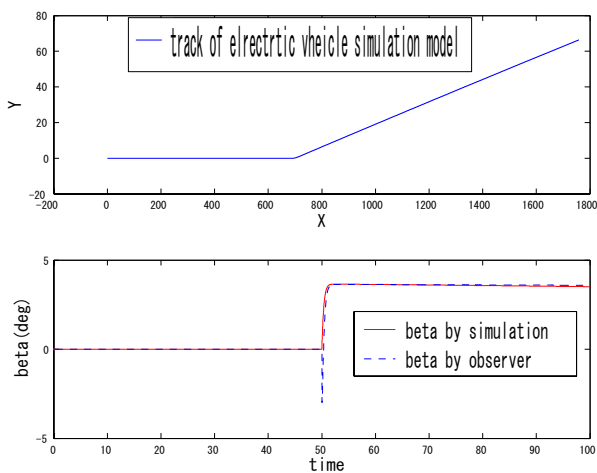


図 4.3:  $C_f=10000$  での simulation 結果

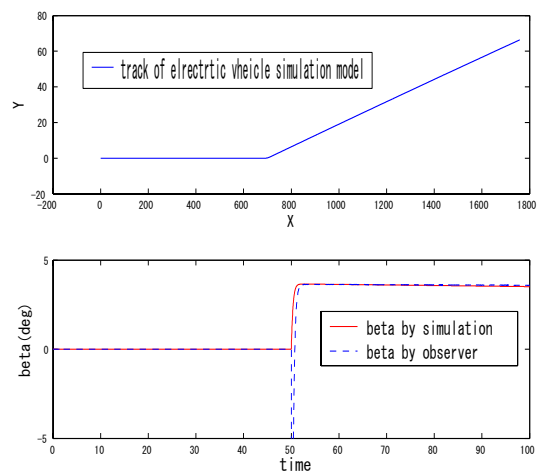


図 4.4:  $C_f=3000$  での simulation 結果

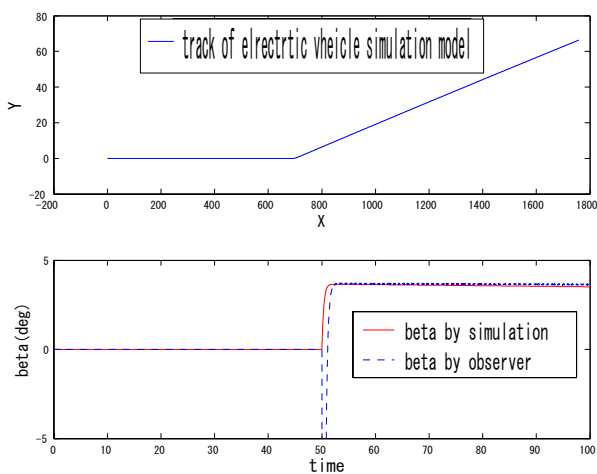


図 4.5:  $C_f=1000$  での simulation 結果

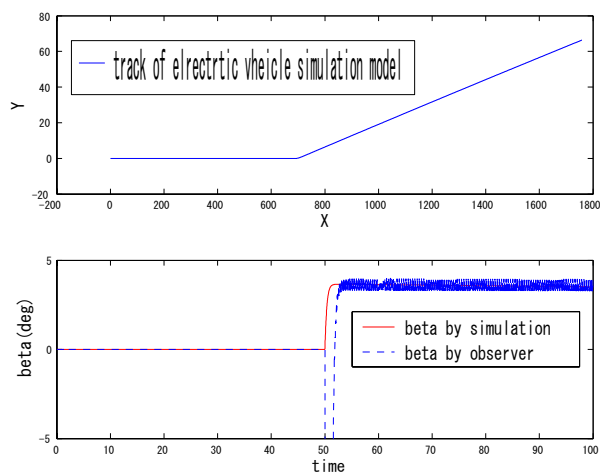


図 4.6:  $C_f=100$  での simulation 結果

# 第5章 東大三月号 II を用いたオブザーバの検証

## 5.1 オブザーバの有効性を証明するための実験方法とその目的

東大三月号 II(図 5.1) を用いて実際に実験を行う。東大三月号は全輪にモータを装備し、RT Linux を制御 PC とした pure EV である。加速度系やジャイロセンサ、 $\beta$  を測定するための光学式非接触速度計を備えているため、オブザーバの検証が行うことができる。東大三月号 II の諸設備は表 5.1 の通りである。

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 5.1: Sensors of UOT March II

次に表 5.2 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  $\delta$ 、路面状態を変えて実験を行うこと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。例えば実験 No.1 ~ 3 では速度に対するロバスト性を検証し、実験 No.4 では  $\delta$  を大きくすることで車両が非線形領域に入っている状態での  $\beta$  推定を試みた。実験 No.5 では路面状態を実験 No.1 ~ No.4 と変えることで、路面状態に対するロバスト性について検証している。実験 No.6 ではオブザーバゲインを式 (3.14) 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の有効性について検証する。

今回の実験は乾燥路では J-turn を速度とステアリング角を複数パターン組み合わせて行った。ウェット路では 40km/s 辺りで円旋回を行った。

パラメータはシミュレーションと同様である。



図 5.1: 東大三月号 II

Experimental No.	$v$ [km/h]	$\delta$ [deg]	road type
1	20	90	dry
2	40	90	dry
3	60	90	dry
4	40	180	dry
5	EV is accelerated, and draw a circle with a radius of 26.5 meters in wet road		
6	In Experimental No.2 we use another Matrix gain when observer model has error		

表 5.2: 実験パターン

## 5.2 乾燥路とウェット路での実験結果

実験結果として、表 5.2 のデータを掲載した。  
図について意味がわかりづらいものを説明する。

noncontact speed meter 光学式非接触速度計により測定した  $\beta$  を補正したもの (直線で  
ほぼ 0 になるようにしている)

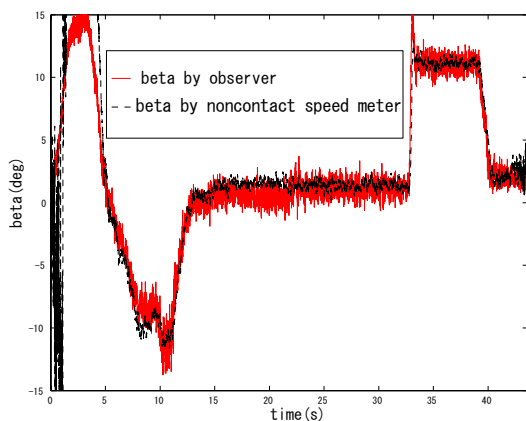
beta by observer オブザーバーによる  $\beta$  の推定値

ay by acc-meter 加速度系による横力の測定値

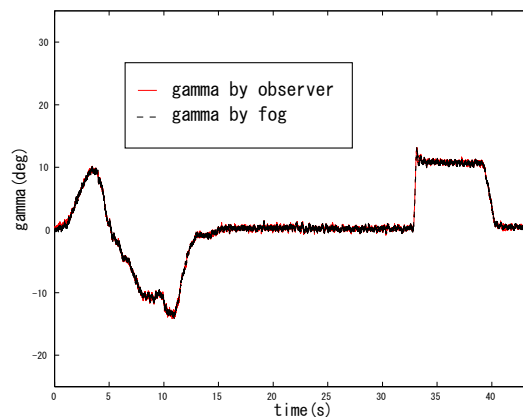
steering angle ハンドル角を補正したもの (直線でほぼ 0 になるようにしている)

掲載している実験データはセンサから受け取った生データではない。センサ情報はオフ  
セットが生じている。これは EV の直線時のデータから補正している。

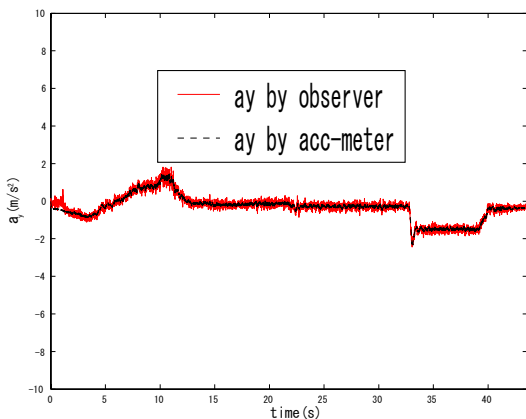
また生データが重心位置のものではないので座標変換を行うことで重心のデータに変換  
している。さらに、データは雑音がのっていたので結果を書く際にはメディアンフィルタ  
をかけることによって除去した。



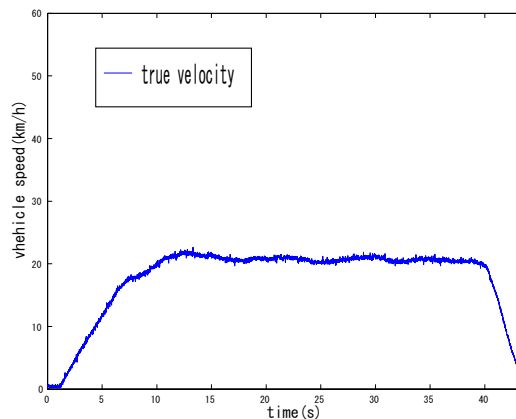
(a) 横すべり角  $\beta$  の測定値と推定値



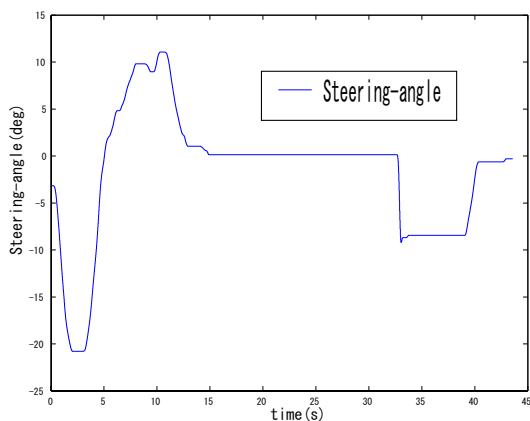
(b) ヨーレート  $\gamma$  の測定値と出力値



(c) 横加速度  $a_y$  の測定値と出力値

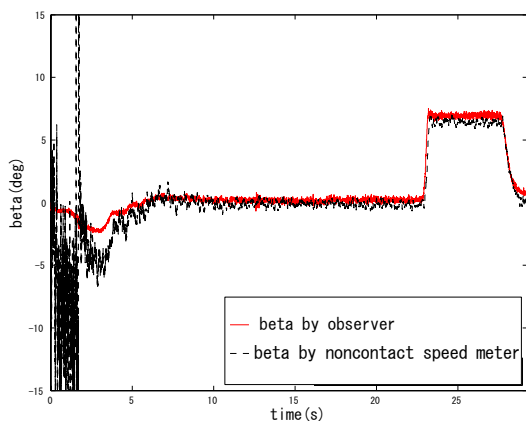


(d) EV の絶対速度  $v$

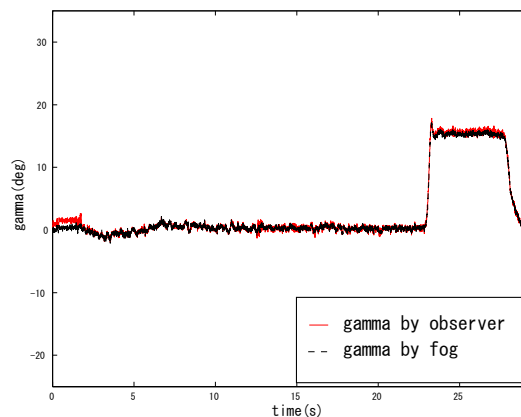


(e) ステアリングアングル  $\delta$

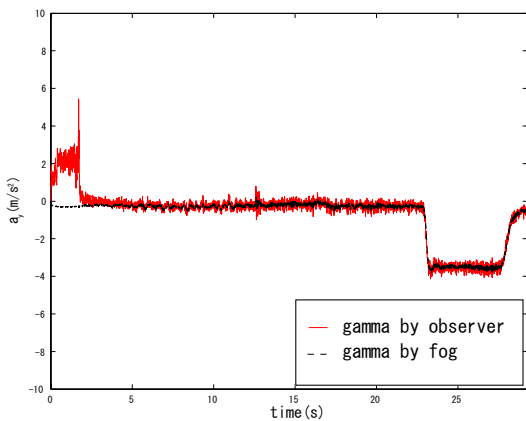
図 5.2: 実験 No.1 の実験結果;20km/h,steering angle 90 度で右旋回した場合



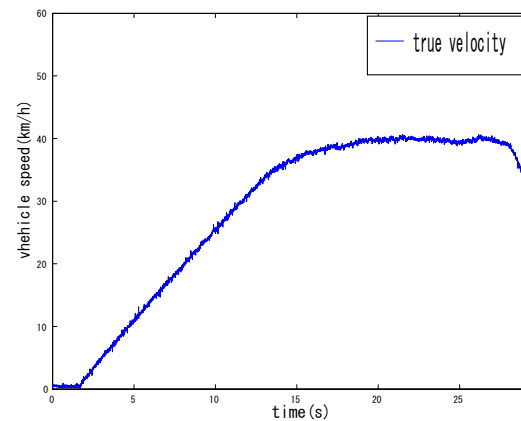
(a) 横すべり角  $\beta$  の測定値と推定値



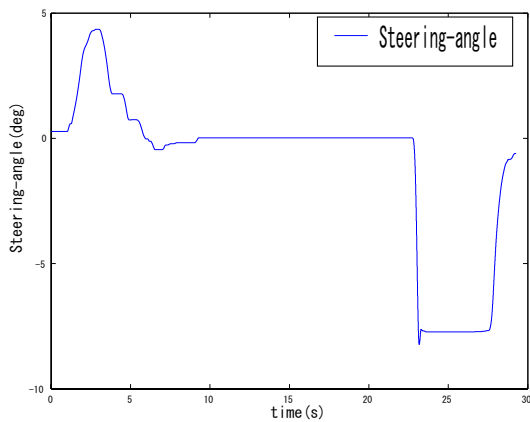
(b) ヨーレート  $\gamma$  の測定値と出力値



(c) 横加速度  $a_y$  の測定値と出力値

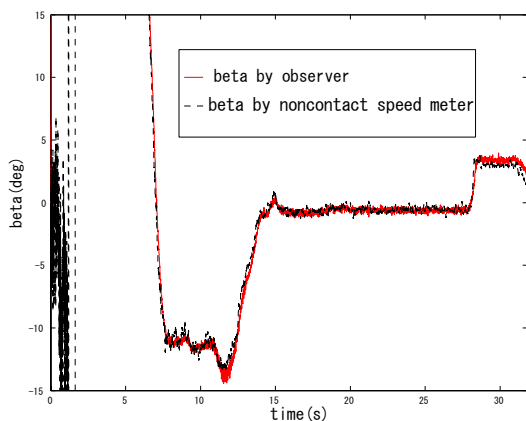


(d) EV の絶対速度  $v$

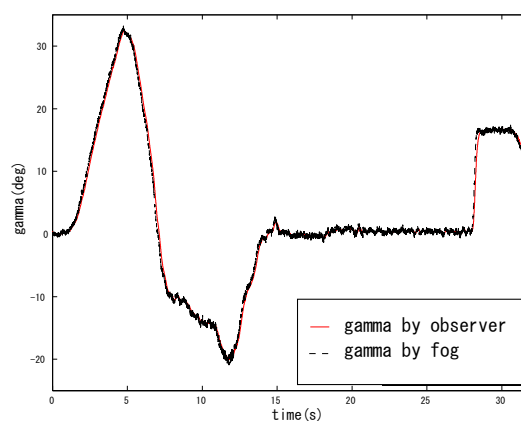


(e) ステアリングアングル  $\delta$

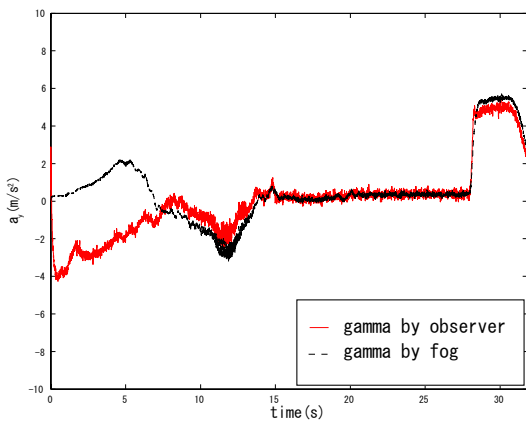
図 5.3: 実験 No.2 の実験結果;40km/h,steering angle 90 度で右旋回した場合



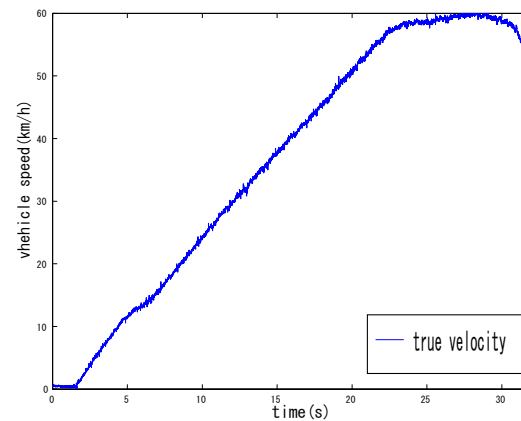
(a) 横すべり角  $\beta$  の測定値と推定値



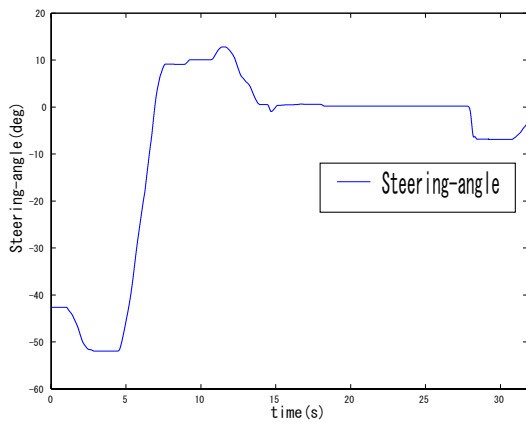
(b) ヨーレート  $\gamma$  の測定値と出力値



(c) 横加速度  $a_y$  の測定値と出力値

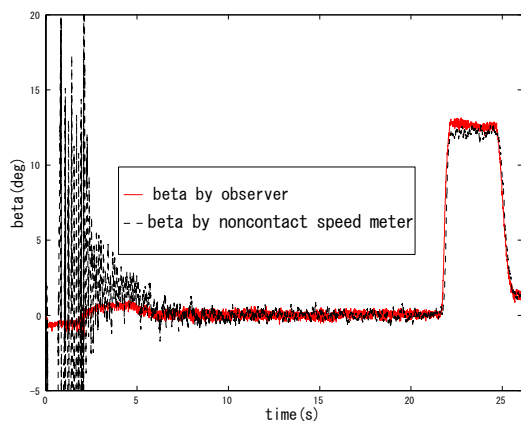


(d) EV の絶対速度  $v$

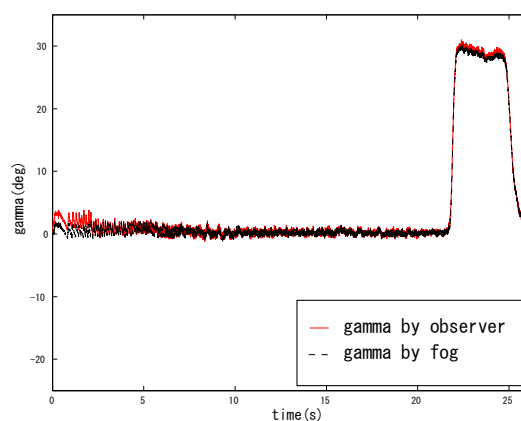


(e) ステアリングアングル  $\delta$

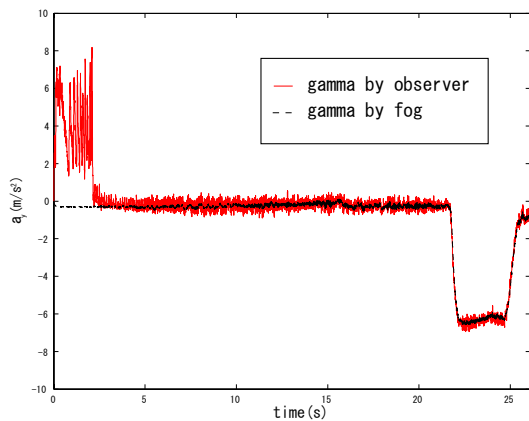
図 5.4: 実験 No.3 の実験結果;60km/h,steering angle 90 度で右旋回した場合



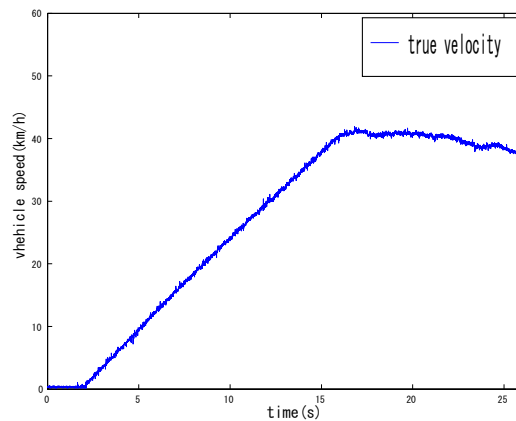
(a) 横すべり角  $\beta$  の測定値と推定値



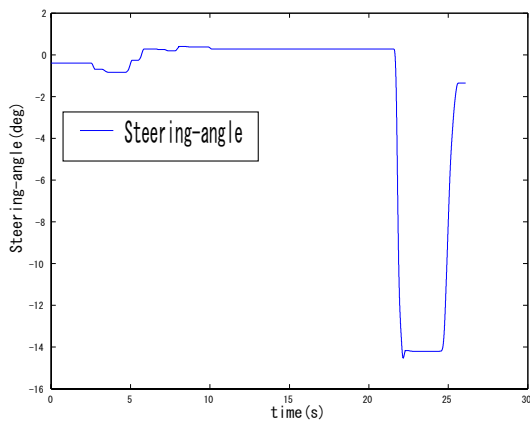
(b) ヨーレート  $\gamma$  の測定値と出力値



(c) 横加速度  $a_y$  の測定値と出力値



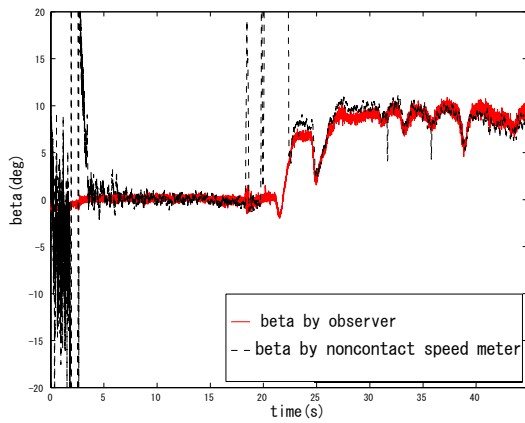
(d) EV の絶対速度  $v$



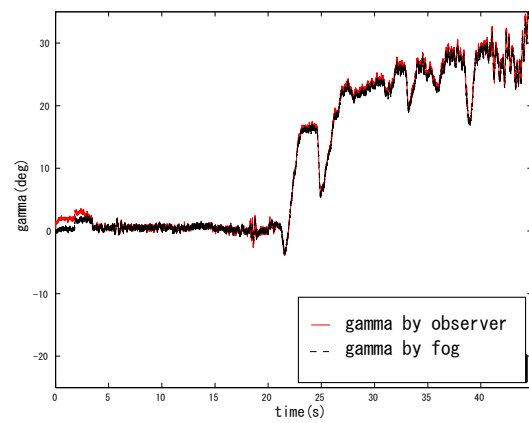
(e) ステアリングアングル  $\delta$

図 5.5: 実験 No.4 の実験結果;40km/h,steering angle 180 度で左旋回した場合

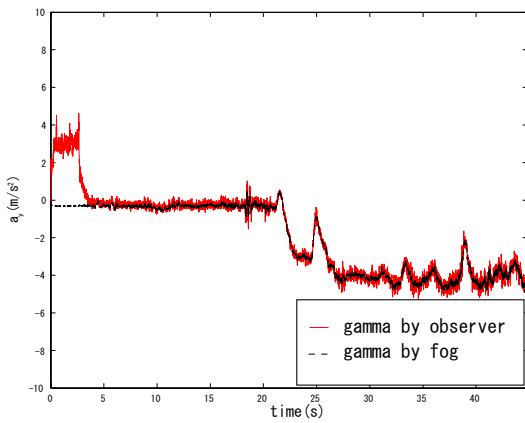




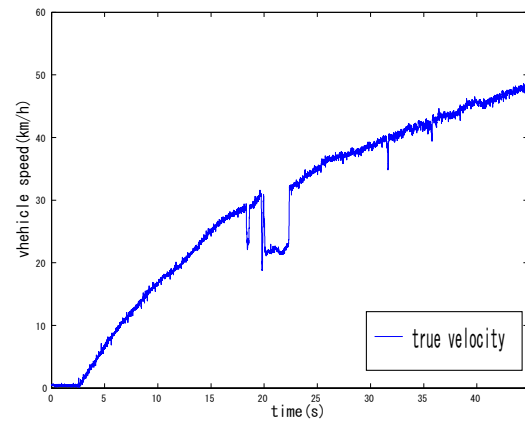
(a) 横すべり角  $\beta$  の測定値と推定値



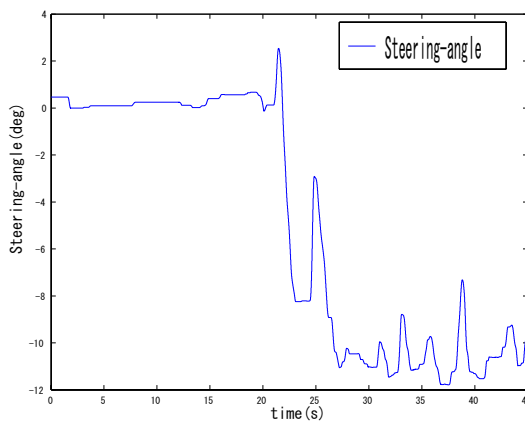
(b) ヨーレート  $\gamma$  の測定値と出力値



(c) 横加速度  $a_y$  の測定値と出力値



(d) EV の絶対速度  $v$



(e) ステアリングアングル  $\delta$

図 5.6: 実験 No.5 の実験結果; Wet 路で円旋回した場合

## 5.3 実験に対する考察

速度変化に対するオブザーバの正確さの検証

実験 No.1,2,3 を比較すると速度が変化しても  $\beta$  の推定値が正確である。どのような速度でも充分推定できるといえる。

非線形領域での  $\beta$  推定についての検証

実験 No.2,4 を比較すると実舵角が大きく変化しても  $\beta$  の推定値は正確である。また実験 4, のデータを見ると  $\beta$  が大きく、非線形領域まで変化しているが、正確に推定できている。このことから非線形領域でも提案したオブザーバは充分に推定できたといえる。

路面状態 (コーナリングパワー) に対するロバスト性の検証

実験 1,5 は同じ程度の速度で、乾燥路とウェット路で走行路が異なるが推定し成功している。パラメータは変えていないので、実際のコーナリングパワーに対してオブザーバはロバストであることが言える。

## 5.4 オブザーバゲインに対する検証-提案したオブザーバゲインの妥当性-

実験 No.5 で行った。オブザーバゲインを計算により定めたが、他の値にオブザーバゲインを定めた場合の実験結果と比較することで提案したオブザーバゲインの有効性について検証する。実験 No.2 において、オブザーバゲインを式 (5.1) のように定めた場合のオブザーバも組み、モデルエラーとして  $a_{11}$  に 30 % の定常誤差を加えて比較した実験結果は図 5.7 のようになった。その結果から、モデルエラーを多く含んでも提案したオブザーバでは誤差がなくなっており、ロバストなオブザーバの設計に成功したと言える。

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1(a_{12}+1)}{a_{11}} - 1 & \frac{a_{11}-\lambda_1}{va_{11}} \\ a_{22} - \frac{a_{21}(a_{12}+1)}{a_{11}} - \lambda_2 & \frac{a_{21}}{va_{11}} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

図についての補足

beta by another gain オブザーバゲインを式 (5.1) にした場合の推定値

beta by noncontact speed meter 光学式非接触速度計により測定した  $\beta$  を補正したもの (直線ではほぼ 0 になるようにしている)

beta by observer 提案したオブザーバによる推定値

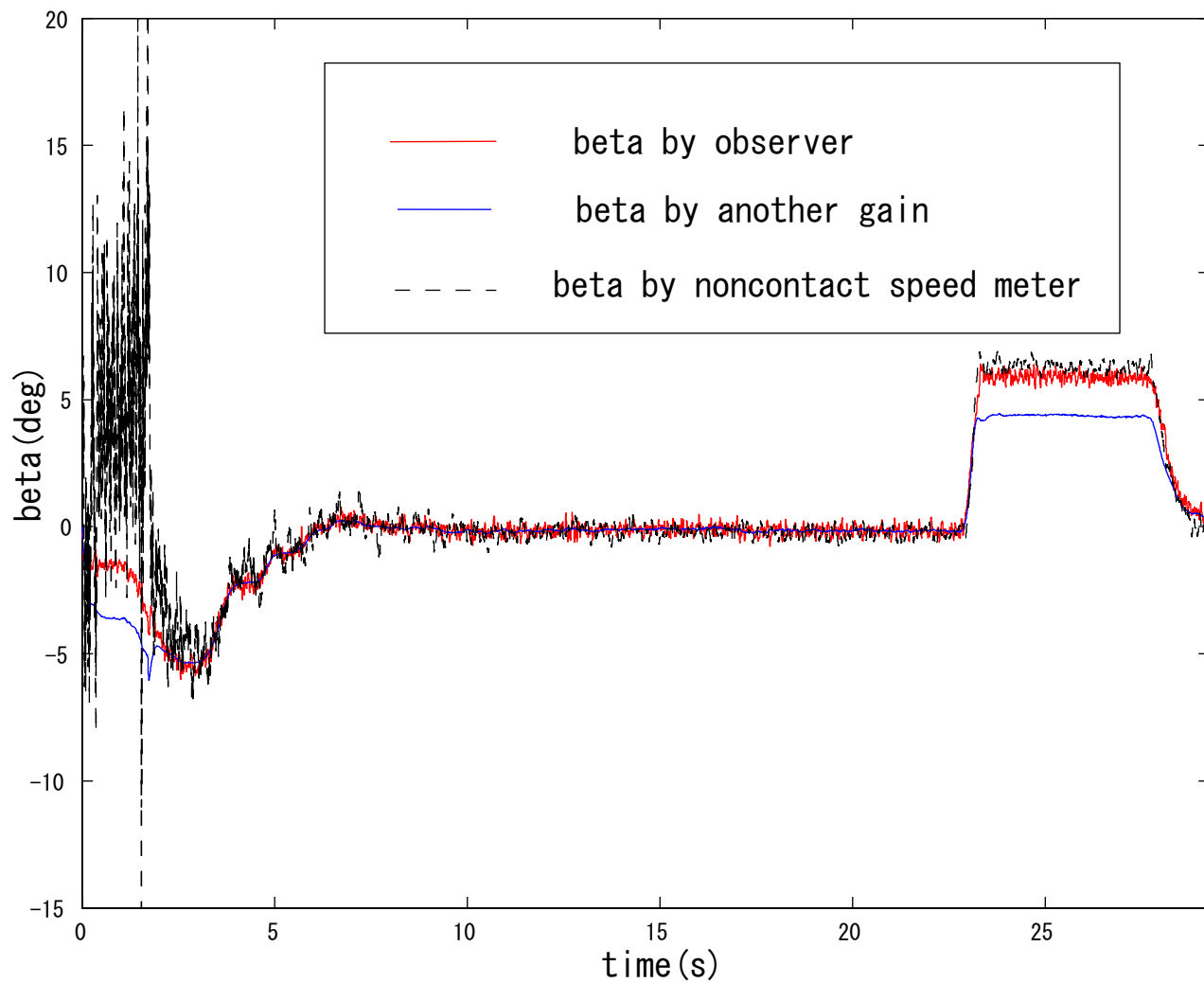


図 5.7: 実験 No.6 の実験結果; モデルエラーを意図的に加えたときの二つの異なるオブザーバによる推定結果

## 第6章 結論

### 6.1 本論文のまとめ

本研究では簡単な線形モデルを利用したの車体すべり角  $\beta$  を推定するオブザーバを提案し、ロバスト性を満たす条件を定量的に解析することで4輪モデルを用いたシミュレーションにおいても、東大三月号 II を用いた実験においてもオブザーバの有効性が証明された。有効性とは以下のことである。

- 短時間で正確に  $\beta$  が推定できる
- モデルエラーに対してロバストである
- 線形領域でも非線形領域でも  $\beta$  が推定できる

さらに、異なるオブザーバゲインでの実験結果と比較することで、提案したオブザーバゲインの有効性についても証明した。

### 6.2 今後の課題

今回はコーナリングパワーを用いたモデルで、 $\beta$  の推定を行った。乾燥路、wet 路でのどちらでも  $\beta$  の推定に成功したことで、コーナリングパワーに対するロバスト性が証明された。しかしコーナリングパワーが急に大きくなりすぎた時には  $\beta$  の推定値がどれだけの誤差が出るのか検証されていない。例えばアスファルトの道路を自動車が行っており、いきなり道路が凍っていた場合、コーナリングパワーが極めて小さい氷の上で推定に成功するのであるだろうか。推定できないならば、コーナリングパワーを推定しながら  $\beta$  を推定していくという方法も提案できるが、他のパラメータを推定しながら目的の信号を推定するというまわりくどいやり方になってしまう。

よってコーナリングパワーを用いない有効的な  $\beta$  推定の方法を提案するののも一つの課題である。例えばEVの特色を活かして、モータトルク等を使った  $\beta$  推定ができれば加速度センサも必要がなく、さらに改良されたオブザーバとなるだろう。

また本研究はEVの長所を活かした  $\beta$  制御を行うことを前提とした、 $\beta$  推定である。よって本題である  $\beta$  制御について話しを進めなければならない。 $\beta$  制御といっても  $\beta$  のみの制御ではなく、ステアリング角と左右の駆動力差から生じるヨーモーメントを入力、 $\beta$  と  $\gamma$  を出力とした2入力2出力系の制御を行うものであり、様々な手法が提案されているが有効なものはまだなく難しい課題である。過去の研究としてはDYCとAFSを組み合わせた制御[13]などが行われているがまだ十分でない。 $\beta$  と  $\gamma$  を組み合わせた制御が大きな課題である。

## 参考文献

- [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.onMechatronics*, Vol.4, No.1, pp.9-16, 1999.
- [3] 堀内泰:"車両挙動安定化制御システムにおけるタイヤモデルの提案",自動車技術会学術講演会前刷集, No64, pp.5-8, 1998.
- [4] 原哲:"車輪の駆動力飽和を考慮した電気自動車の新しい2次元運動制御-東大三月号の製作と実験-",東京大学, 修士論文, 2001.
- [5] 安部正人:"自動車の運動と制御", 山海堂, 1992.
- [6] 堀洋一, 大西公平:"応用制御工学", 丸善, 1998.
- [7] Masugi Kaminaga and Genpei Naito: "Vehicles Body Slip Angle Estimation Using an Adaptive Observer", *Proceedings of AVEC'98*, 1998.
- [8] 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.
- [9] Fredrik Gustafsson: "Monitoring Tire-Road Friction Using The Wheel Slip", *IEEE Control Systems*, pp.42-49, 1998.
- [10] Tomoko Inoue and Yoichi Hori: "Observer Design of Body Angle  $\beta$  for Future Vehicle Control and Experimental Evaluation using the Four-Motored Electric Vehicles", *Proceedings of EVS - 20*, 2003.
- [11] 岩井善太, 井上昭, 川路茂保:"オブザーバ", コロナ社, 1988.
- [12] 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.
- [13] 井上友子:"電気自動車における車体滑り角  $\beta$  の推定と制御", 東京大学, 修士論文, 2003.

## 発表文献(予定)

- [1 ]Yoshifumi Aoki, Tomoko Inoue, Yoichi Hori. :”Robust Design of Gain Matrix of Body Slip Angle Observer for Electric Vehicles and its Experimental Demonstration” , *Proceedings of AMC2004*, 2004
- [2 ] 青木良文, 堀洋一:”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”, 電気学会自動車研究会,VT-04-1,2004

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方から、ご指導、ご助言をいただきました。堀洋一教授にはご多忙の身にもかかわらず、いつも丁寧なご指導をしていただきました。また、研究者としての心構えも学ぶことができました。ここに深く感謝の意を表したいと思います。

技術官の内田利之さんには、自動車の作業を通して色々なことを学ばせていただきました。ねじの締め方から東大三月号 II の仕組みや、その作成苦労など色々有益な話を聞かせていただきどうもありがとうございました。

D2の馬澄斌さんにはつきっきりで英語の論文添削をしていただいてどうもありがとうございました。馬さんの研究に向ける姿勢もすばらしいもので、来年以降お手本にしていきたいと思います。

D2の呉世訓さんには研究室のリーダーの一人として色々お世話になりました。どうもありがとうございました。D2の畠直輝さんには有益なアドバイスを多く頂き、研究のよい結果が出たのも畠さんのおかげです。どうもありがとうございました。

D2の坂東信尚さんには研究のことなど生活のことなど楽しく話をさせていただきました。色々なアドバイスもいただきました。感謝しています。

D1の張炳勳さんにはいつも明るく声をかけていただきました。辛い時などには大変勇気付けられました。感謝しています。

M2の呉俊徳さんとは楽しく話をさせていただき、ありがとうございました。M2の福井龍さんとは帰りの電車の中でバッグパッカーの話など、色々趣味の話をして楽しかったです。どうもありがとうございました。

M2の古川公久さんには直属の先輩として研究のこと、論文の書き方、EVについての話しなど多くのことを教えていただきました。感謝しています。

M1の青木健一郎さんは自動車に関する知識がとても深く、関心させられるとともに多くのことを学ばせていただきました。ありがとうございました。

M1の小玉晋也さんにはLinuxやPCの知識に長けていて、よくお世話になりました。感謝しています。

研究生の Causo Albert さんには英語のHPを作っていただいてありがとうございました。

渡邊信哉くんには同じ卒論生として仲良くさせていただきました。社会に出てがんばって下さい。

同じく卒論生で、同じEVチームの齊藤知行くんとはよく一緒にご飯を食べたり、研究をしたりと1年間一緒に楽しく過ごさせていただきました。感謝しています。

秘書の崎山秀子さんには休日に差し入れをしていただいたり細かい気遣いをさせていただいて本当に感謝しています。

本研究室で過ごした1年間は本当に有意義なもので、僕の人生においてとてもよい刺激になったと同時に忘れえぬ思い出になりました。この場を借りまして御礼申し上げます。