

電気自動車の長所を活かした各輪の駆動力差による車体すべり角の制御

青木 良文*, 内田利之, 堀 洋一 (東京大学)

Control of Body Slip Angle by Difference of Driving Forces at Four Wheels

Yoshifumi Aoki, Toshiyuki Uchida and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

In this paper, a body slip angle observer based on yaw rate γ and side acceleration a_y , and a novel control method of body slip angle β are proposed. Body slip angle observer is robust against parameter variation and change of road. Some experimental results by UOT MarchII (Fig. 2) are shown to verify the effectiveness of the proposed observer.

Next, we proposed new control methods for 2-Dimension control. We control β by yaw moment with PID controller. This method is known as DYC (Direct Yaw moment Control) in Internal Combustion engine Vehicles (ICVs). In EVs, the torque difference can be generated directly with in-wheel motors. We performed experiments by UOT MarchII. The experimental results proved that our proposed method was good.

キーワード: 電気自動車 車体すべり角 推定 ヨーレート 横加速度 ロバスト 線形オブザーバ 制御 PID コントローラ
(Keywords: Electric Vehicle (EV), body slip angle β , yaw rate γ , side acceleration a_y , robust, linear observer, control, PID controller)

1. 序 論

現在、電気自動車 (EV) は環境により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⁾

- (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、さらに β の新しい制御手法について提案した。提案した手法の有効性は実験車両、東大三月号 II により検証する。

2. 車体すべり角 β 推定と制御の必要性

車体すべり角 β 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 β 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 β 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 γ と車体すべり角 β である。 γ 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、推定する必要が出てくるのである。

3. 電気自動車における車体すべり角の推定

3.1 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。前輪を操舵できる時の車両 2 次元運動を詳細に表すモデルは車両の 4 輪モデルと呼ばれている。しかし本研究では従来からよく知られている一般車両の 2 輪モデルの電気自動車へ適応させたモデルをオブザーバのノミナルプラントに用いた。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 1) を用いて、設計の容易な線形オブザーバ

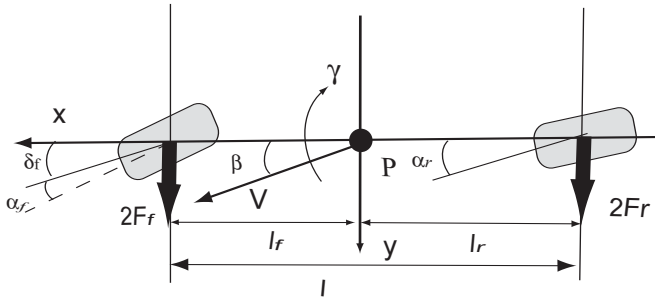


図1 車両運動の2輪モデル

を構成し、ロバスト化をおこなった。図1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、 α_f は前輪のスリップ角、 α_r は後輪のスリップ角、 δ_f はタイヤの実舵角を示す。

二輪モデルから求められる状態方程式は式(1)のようになる。(状態方程式の導出の過程は省略させていただく)

$$\dot{x} = Ax + Bu \dots\dots\dots (1)$$

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

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

ここで、 C_f, C_r :コーナリングパワー係数 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である。

コーナリングパワー C_f, C_r は式(2)で定義される。

$$C_f = \frac{\partial F_{yf}}{\partial \alpha_f} \Big|_{\alpha_f=0} \quad C_r = \frac{\partial F_{yr}}{\partial \alpha_r} \Big|_{\alpha_r=0} \dots\dots\dots (2)$$

ただし F_{yf}, F_{yr} は前後輪に発生する横力である。

3.2 従来の車体すべり角 β の推定方法

β 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。

3.2.1 直接積分法による推定法

直接積分による推定法とは式(3)から β を求めるものである⁽³⁾。

$$v(\dot{\beta} + \gamma) = a_y \Leftrightarrow \beta = \int \left(\frac{a_y}{v} - \gamma \right) dt \dots\dots\dots (3)$$

この方法の長所は式(3)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)に影響されない点にある。

しかし推定値の正確さが a_y, γ の値のみに起因してしまうため、高性能センサがないと β 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。

3.2.2 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。

β 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 γ, δ_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 β 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⁽⁴⁾⁽⁵⁾。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。

3.3 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 β 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 γ, δ_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。⁽⁶⁾

横加速度 a_y をオブザーバに取り込むために、式(1)と式(3)を利用して a_y を次のように再構成する。

$$a_y = v(a_{11}\beta + a_{12}\gamma + b_{11}\delta + \gamma) \dots\dots\dots (4)$$

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(5)が導かれる。

$$y = Cx + Du \dots\dots\dots (5)$$

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

表 1 東大三月号 II の諸装備

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

3・3・1 . オブザーバの構成

本稿では式 (6)、(7) の同一次元オブザーバを利用して、線形オブザーバを設計する。

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - K(\hat{y} - y) \dots\dots\dots (6)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du \dots\dots\dots (7)$$

ここで K はオブザーバゲインである。

推定誤差 $e = \hat{x} - x$ は式 (8) を満たす。

$$\dot{e} = (A - KC)e \dots\dots\dots (8)$$

式 (8) は K の値を変えることで $A - KC$ 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。

3・3・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、 β 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。以下のようにパラメータ誤差に対して提案した線形オブザーバをロバスト化した⁽⁷⁾。

式 (4) と式 (6) により、オブザーバによる推定値 $\hat{\beta}$ が導かれる。

$$\dot{\hat{\beta}} = a_{11}\hat{\beta} + a_{12}\hat{\gamma} + b_{11}\delta_f - k_{11}(\hat{\gamma} - \gamma) - k_{12}(\hat{a}_y - a_y) \dots\dots (9)$$

モデルエラーのない β の状態方程式は次式で表される。

$$\dot{\beta} = a'_{11}\beta + a'_{12}\gamma + b'_{11}\delta_f \dots\dots\dots (10)$$

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 (9) と式 (10) により、 $\dot{\hat{\beta}} - \dot{\beta}$ は次のように計算される。

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

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

γ はジャイロセンサにより測定できるため、 $\hat{\gamma}$ と γ 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なる。

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

式 (12) により、式 (11) は次式のように表される。



図 2 東大三月号 II

Fig. 2 UOT MarchII

$$\dot{\hat{\beta}} - \dot{\beta} = (a_{11} - 1)(\hat{\beta} - \beta) \dots\dots\dots (13)$$

式 (13) の固有値は負であるため、 $\hat{\beta}$ は β 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。

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{C_f} \frac{(lf - lr)I}{2(lf^2 + lr^2) + 4lflr} - 1 & \frac{1}{v} \\ -\lambda_1 - \lambda_2 & \frac{m(lf^2 + lr^2)}{(lf - lr)I} \end{bmatrix} \dots\dots (14)$$

ここで λ_1 と λ_2 はオブザーバの極である。式 (14) には車体速度が入っているが、右前輪の速度 v_{fr} と左前輪の速度 v_{fl} を使って次のように表される。

$$v \doteq \frac{v_{fr} + v_{fl}}{2} \dots\dots\dots (15)$$

3・4 . 東大三月号 II による車体すべり角 β の推定実験

3・4・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 (図 2)。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、 β 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)。

車両速度 v 、実舵角 δ_f 、路面状態をドラスティックに変えて実験を行い、提案したオブザーバの正確性を検証した。さらにパラメータに意図的に誤差を加える事でロバスト性について検証した。

3.4.2 . 実験結果

図3と図4はそれぞれ実験結果を表している。図3~4の(a)は測定された β と推定された $\hat{\beta}$ の時系列であり、図3(b)と図3(c)はそれぞれ測定された a_y と γ 、オブザーバにより出力された \hat{a}_y と $\hat{\gamma}$ である。

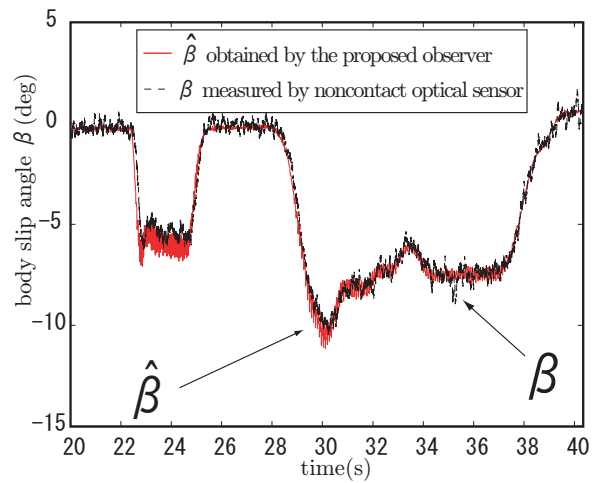
図3の実験では乾燥路から湿潤路に変えることで実際にコーナリングパワーを変えた。実験結果を見ると実際のコーナリングパワーの値は変化しているが、パラメータが一定の提案したオブザーバは β の推定に成功していることが理解できる。提案したオブザーバゲインの設計により線形オブザーバがコーナリングパワーの変動に対してロバストになっていることがわかる。さらに β の大きさが10[deg]になっても推定できているために、非線形領域でも十分に推定できていると言える。

図4の実験では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(16)のように設定したものである。式(16)は式(9)のようなパラメータ変動を補償する手法をとらず式(8)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 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。

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1(a_{12}+1)}{a_{11}} - 1 & \frac{a_{11}-\lambda_1}{va_{11}} \\ a_{22} - \frac{a_{21}(a_{12}+1)}{a_{11}} - \lambda_2 & \frac{a_{21}}{va_{11}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

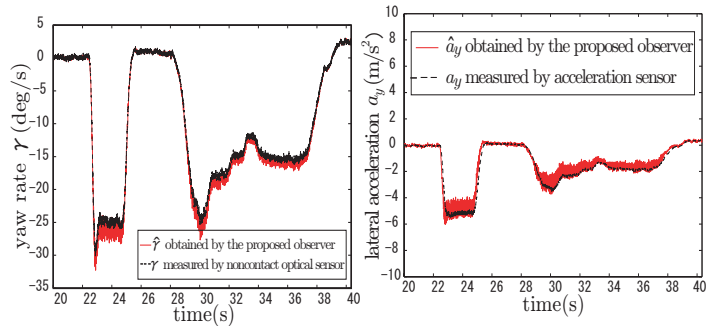
4. 電気自動車の長所を活かした車体すべり角制御手法の提案

前章では、車体すべり角の線形オブザーバによる新しい推定方法を提案し、実車両による実験データから提案手法の正確性、ロバスト性が証明された。そこで、この章では車体すべり角の制御の一手法を提案したい。最初に述べたように、車体のすべり角は自動車の安全性にかかせないパラメータである。今回は電気自動車の長所を活かした、左右の駆動力差による β の新しい制御方法を提案し、実車両により実験をすることでその制御手法の効果について検証した。



(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3 wet路で旋回した場合の結果

Fig. 3 EV was rotated on the wet road

4.1 . 参照値 β_{ref} の作成

提案する制御は β を参照値 β_{ref} に追従させ、安定化を図る制御である。よってドライバの意図に合わせて β_{ref} を作る必要がある。自動車をどのようなモデルをドライバが求めているか、どのようなモデルに追従させるのがよいかというのは議論の余地があるがそこについては深く追求しないことにする。 β_{ref} は今回は路面状態が良好な自動車の線形モデルとし、式(17)で表される。

$$\beta_{ref} = \frac{(s - a_{22})b_{11} + a_{12}b_{21}}{(s - a_{11})(s - a_{22}) - a_{12}a_{21}} \delta_f \dots\dots\dots (17)$$

ここで $a_{11} \sim a_{22}$ は式(1)内の行列Aの要素、 b_{21} は式(1)内の行列Bである。

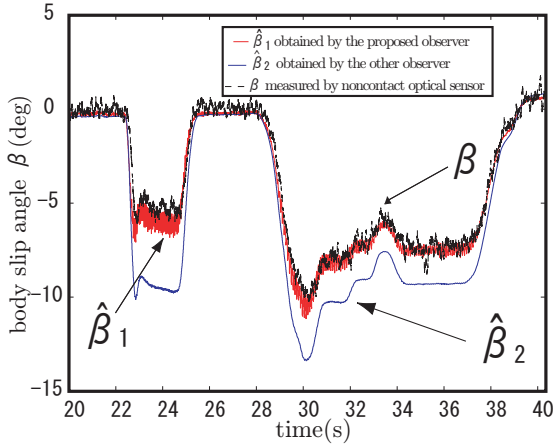


図4 b_{11} に 70% のエラーを含んだ場合の β の二つのオブザーバによる推定値と測定値

Fig. 4 Measured value and estimation of β with two different gain matrixes; Speed is 40km/h and steering angle δ is 90[deg]

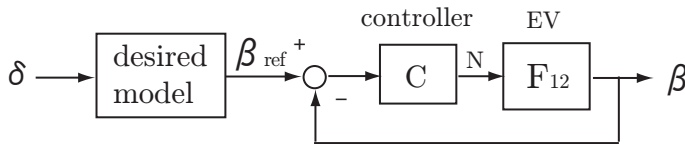


図5 提案する車体すべり角の制御手法のブロック図

4.2 制御方法の提案

今回提案する制御のブロック線図5のようになる。制御の手法は現在まで様々な手法が提案されているが、実用性を考えPIDコントローラを用いた。コントローラを設計するためのモデルは提案したオブザーバと同じく車両の二輪線形モデル(式(1))を利用した。

ここで F_{12} は次の式で定義される、入力ヨーモーメント N から車体すべり角 β までの伝達関数である。

$$F_{12} = \frac{a_{12}b_{22}}{(s - a_{11})(s - a_{22}) - a_{12}a_{21}} \dots\dots\dots (18)$$

図5の制御ブロックの伝達関数は次のようになる

$$\frac{\beta}{\beta_{ref}} = \frac{CF_{12}}{1 + CF_{12}} \dots\dots\dots (19)$$

式(19)の伝達関数の極を自由に決定するためには積分器、微分器、比例ゲインのすべて要素が必要になり、コントローラは式(20)のように表すことができる。

$$C = K_1s + K_2 + \frac{K_3}{s} \dots\dots\dots (20)$$

式(18)と式(20)を式(19)に代入すると以下ようになる。

$$\frac{\beta}{\beta_{ref}} = \frac{(K_1s^2 + K_2s + K_3)a_{12}b_{22}}{s^3 - s^2(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) + (K_1s^2 + K_2s + K_3)a_{12}b_{22}} \quad (21)$$

ここで分母をまとめると以下ようになる。

$$\begin{aligned} \text{分母} &= s^3 + s^2(-a_{11} - a_{22} + K_1a_{12}b_{22}) \\ &+ s(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} + K_2a_{12}b_{22}) + K_3a_{12}b_{22} \quad (22) \end{aligned}$$

極配置法により分母が式(23)のようになるようにする。

$$\text{分母} = (s - \alpha)(s - \beta)(s - \gamma) \dots\dots\dots (23)$$

式(22)と式(23)の係数を比較すると、コントローラのゲインが以下のように求まる。

$$\begin{aligned} \alpha\beta\gamma &= -K_3a_{12}b_{22} \\ \alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha &= a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} + K_2a_{12}b_{22} \quad \dots (24) \\ \alpha + \beta + \gamma &= -(-a_{11} - a_{22} + K_1a_{12}b_{22}) \end{aligned}$$

変形して

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{a_{11} + a_{22} - (\alpha + \beta + \gamma)}{a_{12}b_{22}} \\ K_2 &= \frac{\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha - a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21}}{a_{12}b_{22}} \quad \dots\dots\dots (25) \\ K_3 &= -\frac{\alpha\beta\gamma}{a_{12}b_{22}} \end{aligned}$$

以上より制御器のゲインが求まった。

5. 東大三月号IIによる制御実験

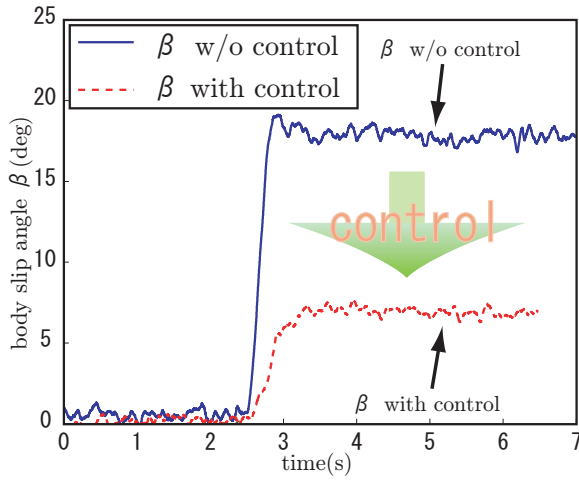
5.1 実験概要

前章で提案した制御手法の効果を、東大三月号IIにより検証した。ここでは実験結果を2つ掲載する。実験 No.1 では約40Km/hの一定速度で走行中、ステアリングをややステップ上に80[deg]切る実験を行った。実験 No.2 では、さらにステアリングの角度を大きくして、ステップ上に約150[deg]切る実験を行った。

5.2 実験結果

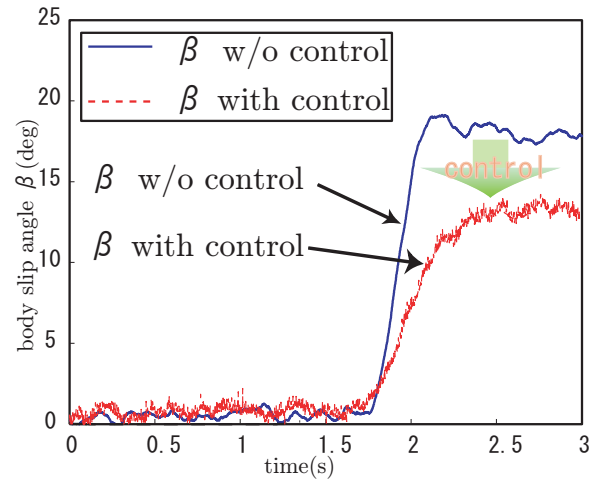
実験 No.1 では図6のような結果が得られた。制御を行っていない場合の実験では β の値が大きくなり危険な状態になっているが、それに対して提案した制御を行っている方は β の発生が抑圧され、安定に走行していることがわかる。

実験 No.2 の結果は図7のようになった。実験 No.1 と同様、 β の大きさは小さくなっているが、 γ は逆に大きくなっている。これは入力である駆動力差が大きくなりすぎたために、後輪が空転し γ が大きくなったと考えられる。目標とする駆動力差を出しながらも、スリップを起こさないような機構や制御が必要である。



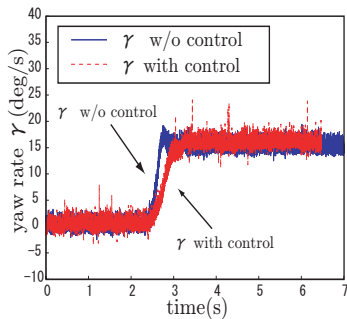
(a) β の測定値

(a) Measured value and estimation of β



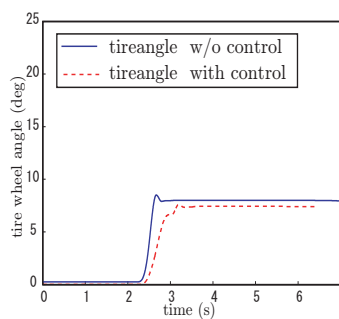
の測定値

(a) Measured value and estimation of β



(b) ヨーレート γ

(b) Measured value of γ

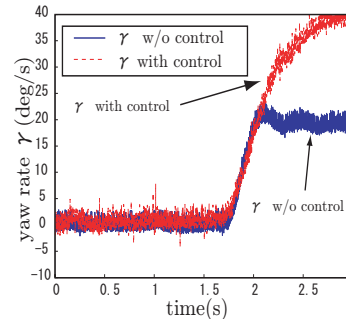


(c) 前輪の角度 δ_f

(c) Front steering angle δ_f

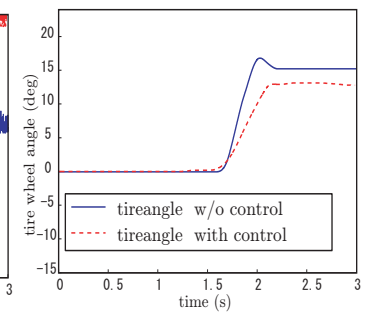
図6 No.1:車体すべり角の制御実験の結果

Fig. 6 No.1: results of β control



(b) ヨーレート γ

(b) Measured value of γ



(c) 前輪の角度 δ_f

(c) Front steering angle δ_f

図7 No.2:車体すべり角の制御実験の結果

Fig. 7 No.2: results of β control

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) Fredrik Gustafsson: "Monitoring Tire-Road Friction Using The Wheel Slip", *IEEE Control Systems*, pp.42-49, 1998.
- (6) 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.
- (7) 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.

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、さらに車体すべり角の制御を行った。

提案したオブザーバ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。

提案した制御を東大三月号 II を用いて実験を行った。その結果車両を安定な状態にさせることに成功した。しかし駆動力差の大きさ、変化の仕方によっては車輪が空転してしまう可能性も残ったが、MFC⁽²⁾などのマイナーループを組むことで、この問題は改善されると考えている。