Rolling Stability Control Utilizing Rollover Index for In-wheel Motor Electric Vehicle

Kiyotaka Kawashima Student Member (The University of Tokyo, kawashima@horilab.iis.u-tokyo.ac.jp)

Toshiyuki Uchida Non-member (The University of Tokyo, uchida@horilab.iis.u-tokyo.ac.jp)

Yoichi Hori Senior Member (The University of Tokyo, hori@iis.u-tokyo.ac.jp)

Keywords: rolling stability control, electric vehicle, disturbance observer, two-degrees-of-freedom control, vehicle motion control

In this paper, a novel integrated stability program (ISP) based on robust rolling stability control (RSC) for in-wheel motor electric vehicle (EV) is proposed. Since EVs are driven by electric motors, they have the following four remarkable advantages: (1) motor torque generation is quick and accurate; (2) motor torque can be precisely estimated; (3) a motor can be attached to each wheel; and (4) a motor can output negative torque as a brake actuator. These advantages enable a high-performance three-dimensional vehicle motion control with a distributed in-wheel-motor system.

In this study, RSC is designed by using two-degree-of-freedom (2-DOF) control, which achieves tracking capability to the reference value and disturbance suppression. Lateral acceleration disturbance $\hat{a}_{yd}$ is estimated by disturbance observer (DOB) using steering sensor δ , lateral acceleration a_y , and differential torque N . The following equation expresses that disturbance, which is lower than the cut-off frequency of Q , is suppressed by DOB.

$$a_y = v + P_{a_y\delta}^n \delta + (1 - Q)\hat{a}_{yd} \dots \dots \dots (1)$$

Fig. 1 shows the experimental results of RSC. Under a constant velocity control of 6.0m/s, Fig. 1(a) shows disturbance roll moment suppression and (b) shows tracking capability to the reference value,

Fig. 1. Experimental result of RSC

which is 80% of the nominal value.

On the other hand, if the constant vehicle speed is assumed and lateral acceleration is suppressed, the yaw rate is also suppressed as long as the differentiation of side slip is not controlled. This physical constraint makes RSC and yaw stability control (YSC) incompatible. Therefore, variable weight-ISP (VW-ISP) and variable reference-ISP (VR-ISP) are proposed using rolling state information. In order to detect rollover, advanced rollover index RI ($0 < RI < 1$) is introduced. For VW-ISP, when RI is high, which means a vehicle is likely to roll over, the weight of RSC is set as high. On the other hand, when RI is small, which means a vehicle is not likely to roll over, the weight of YSC is set as high. However, steady state error exists because integral control is not applicable for VW-ISP. Therefore, VR-ISP, which varies the reference value of RSC by RI , is also proposed to decrease steady state error.

Fig. 2(a) shows the comparison of RSC and VW-ISP. In the case of RSC, lateral acceleration is strongly suppressed. On the other hand, in the case of VW-ISP, yaw rate at steady state is recovered close to the reference value. Fig. 2(b) shows the comparison of VW-ISP and VR-ISP. Steady state error exists in the case of VW-ISP, whereas steady state error is almost zero in the case of VR-ISP.

Fig. 2. Experimental result of ISP

ロールオーバー指標を用いたインホイールモータ搭載電気自動車におけるロール安定化制御

学生員 河島 清貴* 非会員 内田 利之*
上級会員 堀 洋一**

Rolling Stability Control Utilizing Rollover Index for In-wheel Motor Electric Vehicle

Kiyotaka Kawashima*, Student Member, Toshiyuki Uchida*, Non-member, Yoichi Hori**, Senior Member

In this paper, a novel integrated stability program (ISP) based on robust rolling stability control (RSC) for in-wheel electric vehicle (EV) is proposed. Since EVs are driven by electric motors, they have the following four remarkable advantages: (1) motor torque generation is quick and accurate, (2) motor torque can be estimated precisely, (3) a motor can be attached to each wheel, and (4) a motor can output negative torque as a brake actuator. These advantages enable a high-performance three-dimensional vehicle motion control with a distributed in-wheel-motor system. Rolling stability is important for all classes of light-vehicles, especially, for EVs that have narrow tread and high center of gravity. In this study, RSC is designed using two-degree-of-freedom control (2-DOF), which achieves tracking capability to reference value and disturbance suppression. However, as the drivability of the vehicle will be changed significantly if only RSC is applied, vehicle rolling motion should be controlled depending on the rolling state. Therefore, variable weight-ISP and variable reference-ISP are proposed using rolling state information. For detecting rolling state, rollover index (RI) is introduced. The validity of the proposed methods is shown by the simulation and the experimental results.

キーワード：ロール安定化制御，電気自動車，外乱オブザーバ，二自由度制御，車両運動制御

Keywords: rolling stability control, electric vehicle, disturbance observer, two-degrees-of-freedom control, vehicle motion control

1. はじめに

電気自動車（EV）はエンジン車に比べて燃費面で優れているだけでなく，電気モータの高い制御性を利用することで高性能な車体姿勢制御が可能となる。本論文ではインホイールモータ搭載 EV（IMEV）における外乱にロバストなロール安定化制御（Rolling stability control：RSC）と，ロールオーバー指標を用いた RSC とヨー運動制御（Yawing stability control：YSC）の統合制御（Integrated stability program：ISP）を提案する。

〈1・1〉 インホイールモータを搭載した電気自動車の利点 インホイールモータを搭載した EV は以下のような利点を持っている⁽¹⁾：

- トルク出力がエンジンよりも 2 桁ほど早く，空転防止制御が適用できる。
- 出力トルクを電流から容易に知ることができるので，路面状態推定を行うことができる。
- 基本的に加速と減速に違いがないため，従来の PWM 油圧ブレーキ制御に比べて滑らかで高性能なブレーキ制御が可能となる。
- 電気モータは小型軽量であるため各輪に分散配置し，駆動力差によって車体姿勢制御が適用できる。

これらの電気モータの特性を生かして，これまでに EV におけるスリップ抑制制御や路面状態推定法，ダイレクトヨーモーメント制御法が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。

〈1・2〉 本研究の背景と目的 RSC は乗り心地だけでなく，車高の高いトラックや SUV などの安全性に対しても非常に重要である。NHTSA によれば，全事故におけるロールオーバーの事故は 3% であるにも関わらず，致死率は全事故の 33% を占める⁽³⁾。電池を床面に敷き詰めて低重心化が図られているとはいえ，エンジン車に比べ EV は比較的小型で Static stability factor（SSF：車輪幅/車高）が小さくなる傾向にある。また EV の場合操縦性も大きく変わってくるため YSC や RSC を含めたシャーシ技術は重要にな

* 東京大学工学系研究科電気工学専攻
〒113-8654 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

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻
〒277-8561 柏市柏の葉 5-1-5 新領域基盤棟 7E1
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo
7E1 Transdisciplinary Sciences Bldg., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa
277-8561

と考えられる。

これまでに RSC システムは自動車メーカや部品メーカ等で ABS システムを用いて研究開発が進められてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。一般的な RSC システムは急激な横加速度やロール角度の発生に応じて、油圧ブレーキ力を用いて各輪独立に制御を行う。しかしブレーキアクチュエータ制御は PWM (Pulse Width Modulation) 制御であり、精確なトルクを出力することも把握することも難しい。

エンジン車で行われてきた RSC だが、インホイールモータ搭載 EV の場合には両回転方向トルク出力でき、またモータ電流を計測することによって精確なトルク出力が把握可能となる。

アクチュエータの利点に加え、提案する RSC は外乱オブザーバ (DOB) をベースとした、目標値追従性能と外乱抑圧性能という二つの制御性能を独立に設計可能な二自由度制御を適用している。近年ヨーレートやピッチング制御、またパワーステアリングの制御において二自由度制御が提案されており、自動車制御分野で多くの適用例が報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本論文では、まずステアリング操舵角と車速から計算される目標値に対する追従性と、横からの突風等の外乱に対するロバスト性という二つの性能が二自由度制御によって同時に実現されることを示す。さらに、ロールオーバーの危険度を表すロールオーバー指標 (RI) を用いて RSC だけでなく、ヨー運動も考慮した統合制御 (ISP) についても提案する。

2. ロール安定化制御

筆者らは以前にロールレートをを用いた RSC を提案していた⁽⁸⁾。しかし、ロールレートはロール角度の微分値であり高周波ノイズや、ロール運動過渡期には信号が表れるものの一定横加速度で旋回中などの定常状態には信号が取り出せないことから、望むような性能が得られなかった。そこで、今回ロールダイナミクスの時間遅れを考慮してロール角度ではなく、横加速度を用いたロール安定化制御系を設計した。

〈2・1〉 横加速度外乱オブザーバ 制御系で目標値応答と外乱応答は二つの重要な特性であり、独立に設計可能である。PID 制御を代表とする 1 自由度制御系では目標値と実際値の差を取ったところで大きな情報が欠落し両者は独立に設計できない。この場合、外乱応答を改善するにはフィードバック (FB) ゲインを大きくするしかないが、システムが不安定になるばかりか、指令値への追従性も悪くなってしまう。そこで、外乱抑圧と指令値追従性を別々に設計できる DOB をベースとした二自由度制御を RSC へ適用した。

Fig. 1 に横加速度 DOB のブロック線図を表す。提案する DOB は車体速度 V 、前輪ステアリング角度 δ 、駆動力差 N 及び横加速度 a_y を使って、外部環境からの横加速度外乱を推定する。

Fig. 1 をもとにして横加速度指令値 u 、 δ 及び横加速度外

Fig. 1. Lateral acceleration DOB

Fig. 2. 2-DOF for RSC based on DOB

乱 a_{yd} から a_y への伝達関数は以下で表わされる。ここで横加速度指令値は前輪操舵角と車体速度 V から与えられ、ロールモーメントは左右インホイールモータの駆動力差 N^* で与えられる。

$$a_y = \frac{\frac{P_{a_y N}}{P_{a_y}^n} (K_{ff} + K_{fb})}{1 + \frac{P_{a_y N}}{P_{a_y}^n} K_{fb}} u + \frac{P_{a_y \delta}}{1 + \frac{P_{a_y N}}{P_{a_y}^n} K_{fb}} \delta + \frac{1}{1 + \frac{P_{a_y N}}{P_{a_y}^n} K_{fb}} a_{yd} \quad (1)$$

また推定横加速度外乱 $\hat{a}_{yd}$ と a_y は以下のように記述される。

$$\hat{a}_{yd} = a_y - P_{a_y N}^n N^* - P_{a_y \delta}^n \delta \quad (2)$$

$$a_y = P_{a_y N}^n N^* + P_{a_y \delta}^n \delta + a_{yd} \quad (3)$$

(2), (3) 式から駆動力差指令値を消去すると、外乱推定は、

$$\hat{a}_{yd} = \frac{P_{a_y N}}{P_{a_y}^n} \left(\left(\frac{P_{a_y N}}{P_{a_y}^n} - 1 \right) a_y + (P_{a_y \delta} - P_{a_y \delta}^n) \delta + a_{yd} \right) \quad (4)$$

となる。(4) 式で、第一項と第二項はモデルエラーであり、第三項は横加速度外乱である。モデルエラーが十分小さいならば、 $\hat{a}_{yd}$ は近似的に横加速度外乱に等しくなる。

〈2・2〉 二自由度制御による外乱抑圧性能とモデル追従性能 Fig. 2 は提案する二自由度制御を RSC へ適用した場合のブロック線図を示す。推定された横加速度外乱はフィルタ Q をかけられた上で、横加速度指令値へとフィードバックされる。

$$a_y^* = u - Q \hat{a}_{yd} \quad (5)$$

ここで、フィルタ Q はローパスフィルタであり、本論文ではこのカットオフ周波数は 63 rad/s である⁽⁹⁾。

$$Q = \frac{1}{(s\tau) + 1}, \dots\dots\dots (6)$$

(5) 式に (2) 式を代入すると、次式が得られる。

$$a_y = v + P_{ay\delta}^n \delta + (1 - Q)\hat{a}_{yd} \dots\dots\dots (7)$$

Q 及び車両ダイナミクスのカットオフ周波数よりも低い外乱は DOB によって抑圧される。外乱抑圧性能に加えて、(4) 式に示すようにモデルエラーも補償されるため、カットオフ周波数以下であれば車両挙動はノミナルダイナミクスに近いものとなる。

3. RSC と YSC の統合制御

本章では、RSC と YSC との協調制御 (ISP) の必要性和、ロールオーバーの危険度を表した RI について述べる。

〈3・1〉 協調制御の必要性 横加速度は、横滑り角微分値 $\dot{\beta}$ 、ヨーレート γ 、 V を用いて以下の物理式によって表わされる。

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

RSC によって横加速度が過度に抑えられてしまうと、車体速度が一定ならば、 $\dot{\beta}$ を制御しない限り γ も減少し、運転者にとって操縦しにくい車になってしまう。例えば低 μ 路では、タイヤで横力が発生できないために一般的にロールオーバーの危険性よりもドリフトアウトの危険性の方が高くなる。一方高 μ 路では、タイヤがグリップし速度によってはロールオーバーする危険性がある。このように実際に適用するには車体がどれだけロールオーバーの危険性が高いか検知し、その状態量に応じて車両を制御する必要と考えられる。

そこでロールオーバーの危険性を示す指標として RI を取り上げる。これまでもファジー制御を用いたロール状態検知手法が提案されてきた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が、本論文では Yi らが提案しているロールオーバー指標 (RI)⁽¹²⁾に、改良を加えた新しい RI を提案する。 RI は車両ジオメトリとロールモデルの位相面解析をもとに、ロールオーバーの危険性を 0-1 の大きさで表わす指標である。前章で示した外乱にロバストな RSC を設計した上で、さらにこの指標を用いてロールオーバーの状態に応じて駆動力差を制御する ISP を提案する。

本論文では制御入力として駆動力差しか用いていないため、RSC と YSC の協調制御に適用するにあたって、次の 3 通りの実現方法について考察した。

(1) RSC と YSC で横加速度とヨーレートを制御変数として設定し、最適問題として重みを RI で可変とする。しかし RI は時変パラメータで、リアルタイムで FB ゲインに関する方程式を解く必要がある。

(2) RSC と YSC の制御効果の割合を RI で決定する (可変重み (VW) 型)。メリットとしては横加速度とヨーレート両方を制御できるものの、ゲインが時変となるため FB 制御設計には注意が必要となる。例えばwindアップを避けるために積分制御を用いないと定常誤差が残る。ま

Fig. 3. Variable weight ISP

たゲインが変わるため特性方程式が代わり、指令値への収束速度も変わる。

(3) RSC の指令値を RI の関数として用いる (可変指令値 (VR) 型)。メリットとして積分制御が使えるため定常誤差はなくなるが、YSC の効果は期待できなくなってしまう。

(1) は計算量の問題から適用が困難なので除外し、本論文では (2) と (3) について実験及びシミュレーションを行い考察をした。

(2) の場合駆動力差指令値は、各制御の出力である駆動力差に RI で配分されたものと、ロールオーバーの危険に関わらず補償される DOB 分の駆動力差を引いたものとなる (Fig. 3)。

$$\begin{aligned} N^* &= f(RI, N_{RSC}, N_{YSC}, N_{DOB}) \\ &= RI * N_{RSC} + (1 - RI) * N_{YSC} - N_{DOB} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

また (3) の場合は Fig. 2 における指令値生成部分である F において速度だけでなく RI の関数にする。

$$u = (1 - RI(1 - \eta))a_y^* \dots\dots\dots (10)$$

ここで a_y^* は速度変化を考慮した横加速度のノミナル値、 η はノミナル値に対する RSC 適用時の横加速度の低減率である。 RI が 0 の場合は横加速度の指令値とノミナル値は一致し、 RI が 1 の場合はそのまま低減率をかけられた値が指令値となる。

〈3・2〉 ロールオーバー指標 RI はゼロ次元でロールオーバーの危険度を 0-1 で表した指標である。1 に近いほど車両のロール方向への運動が大きくロールオーバーしやすいことになる。

RI を計算するにはロール状態量が必要となり、その中にはロール角度も含まれている。しかし、ジャイロセンサの出力値はロールレートであり、これをそのまま積分しては直流ドリフト成分のために発散してしまう。筆者らは、以前にロールモデル同定⁽⁸⁾及びロール角度推定⁽¹³⁾を提案しているのでこれらについては割愛し、 RI の計算法について示す。

RI は以下の 3 つのロール状態量によって決定される。

1. 現在のロール角度とロールレート
2. 現在の横加速度
3. time-to-wheel lift

である。Yi らの提案する RI では、第 3 項の分母で次元の

Fig. 4. Static roll dynamics of a suspended vehicle

異なるパラメータの和を用いていたため、それぞれ後述の閾値で正規化したものに変更した。(11)式に RI の計算法を示す。

$$RI = C_1 \left(\frac{|\phi|\dot{\phi}_{th} + |\dot{\phi}|\phi_{th}}{\phi_{th}\dot{\phi}_{th}} \right) + C_2 \left(\frac{|a_y|}{a_{yth}} \right) + (1 - C_1 - C_2) \left(\frac{|\phi|\phi_{th}\dot{\phi}_{th}}{\sqrt{(\phi\phi_{th})^2 + (\dot{\phi}\dot{\phi}_{th})^2}} \right),$$

if $\phi(\dot{\phi} - k_1\phi) > 0$,

$RI = 0$, else if $\phi(\dot{\phi} - k_1\phi) \leq 0, \dots\dots\dots$ (11)

ここで ϕ , $\dot{\phi}$ はロール角度とロールレート, C_1 , C_2 , k_1 は非負の定数である ($0 < C_1, C_2 < 1$)。

a_{yth} は車両ジオメトリ (重心高, 輪幅及びロール剛性の関係) の静特性から決定される。Fig. 4 の線分 AB は、懸架車両を高さ h , 幅 d の剛体と見なした時に、車両に加わる横加速度と重力の平衡状態を示している。この線分の内側では重力の影響の方が横加速度の影響よりも大きいため車体はロールオーバーしないが、外側では横加速度の影響が大きくなりロールオーバーに至る。また線分 OC は車両に加わる横加速度の影響とサスペンションが発生させる力の平衡状態を示している。車体を剛体と見なした時、ロール角度 0 からロールオーバーさせるのに必要な横加速度は $\frac{d}{2h}g$ であるが、実際はサスペンションによってばね上が傾くためそれよりも小さい横加速度でロールオーバーに至る。従ってこの二つの直線の交点 C が、車両ジオメトリ解析によって導かれた横加速度閾値 a_{yth} となる。

次にこの a_{yth} とロールダイナミクスを用いてロール角度とロールレートの閾値を決定する。Fig. 5 では、車体重心に a_{yth} が加わった状態で様々な初期値からの $(\phi, \dot{\phi})$ 位相面を描いている。赤い実線で示された領域はロール角度がある角度点 Q に収束する安定領域となり、その外側の青い点線で示された領域はロール角度が増加してロールオーバーに至る不安定領域となっている。車両がロールオーバーするかどうかの限界領域における点 P と点 Q をそれぞれロールレート閾値 $\dot{\phi}_{th}$, ロール角度閾値 ϕ_{th} とした。

Fig. 6 に、例として 40 km/h 一定速度走行中に 2 種類の操舵角 (30 度と 75 度に相当) を加えた場合の RI 及び位相面を示す。操舵角 75 度の場合はロールオーバーするため RI

Fig. 5. Phase plane plot of roll dynamics

Fig. 6. RI and phase plane depending on steering maneuver

は 1 となっており、ロールオーバーの危険度を表していることがわかる。

4. シミュレーション結果

CarSim7.11 と MATLAB R2006b/Simulink を組み合わせた 3 次元車両運動モデルを用いて、シミュレーションを行った。

まず、RSC の有効性を外乱抑圧と指令値追従性の観点から示す。実験における再現性の問題から外乱ロールモーメントは駆動力差で実現している。そして一定速度制御下において直線走行と一定操舵角を加えている際に外乱を加えた。次に操舵角と車体速度から計算される指令値に横加速度が追従することを、正弦波操舵シミュレーションによって確認した。

さらに ISP の有効性を示すために、一定速度制御下でステップ操舵角を加えている際の横加速度応答とヨーレート応答及び軌跡を比較した。

〈4・1〉 RSC の実証

〈4・1・1〉 横風外乱に対するロバスト性 RSC の横風外乱に対する車両安定性をシミュレーションによって示す。まず、車両は 20 km/h 一定速度制御下で直線走行、操舵者はステアリングホイールを 0 deg で保持している時に、横風が 3-6 sec 間に加えられた。Fig. 7 にその結果を示す。加速度情報はノイズが大きいため LPF をかけている。

RSC 作動時には外乱ロールモーメントが駆動力差によって抑えられているのに対し、非制御時には横風によって横加速度が生じ、軌道も大きく外れてしまう。収束に時間がかかっているように見えるのは、外乱を駆動力差として入力しているためタイヤのダイナミクスによる時間遅れが加

Fig. 7. Simulation result of RSC: Disturbance suppression at straight road drive

Fig. 8. Simulation result of RSC: Disturbance suppression at curving

Fig. 9. Simulation result of RSC: Tracking capability to the reference value

わること、横加速度にかけた LPF の影響であると考えられる。

次に、一定操舵角で旋回中に横加速度外乱が加えられた場合について示す。同じく 20 km/h 一定速度制御下で 180 deg ステップ操舵を行ったあと、3–6 sec 間で外乱を加えた。Fig. 8 に示すように RSC 作動時には駆動力差によって外乱が打ち消されていることがわかる。これによって RSC のロバスト性がシミュレーション結果によって示された。

〈4・1・2〉 指令値追従性 本章では RSC の指令値追従性を示す。20 km/h 一定速度制御下で振幅 180 deg の正弦波操舵角を加えた。横加速度指令値はノミナル値の 80% となるように設定されている ($\eta = 0.8$)。Fig. 9 に RSC の横加速度指令値への追従性を示す。非制御時に比べ、横加速度が抑えられ、指令値に追従できていることが確認できた。

〈4・2〉 ISP の実証 ISP の効果をシミュレーションによって検証する。ロールオーバーの実験は安全上不可能なので、実験と比較するため安全な範囲での操舵シミュレーションを行った。20 km/h 一定速度制御下において 180 deg

Fig. 10. Simulation result of ISP (Var. weight): Step steering maneuver

Fig. 11. Simulation result of ISP (var. weight and var. ref.): Step steering maneuver

ステップ操舵角を加えた。この検証では横加速度制御の効果を見るために、横加速度指令値はノミナル値の 80% と設定し ($\eta = 0.8$)、ヨーレート指令値はノミナル値を用いた。

〈4・2・1〉 可変重み型 まず重みを RI で可変とした VW 型 ISP について Fig. 10 にシミュレーション結果を示す。RSC のみの場合過渡状態も定常状態でも横加速度は大きく抑制され、軌跡が最も外側へふくらんでいることがわかる。一方 ISP 作動時には過渡期ではロールレートとともに RI が大きくなるため横加速度が抑えられるものの、定常状態では RSC の効果が下がり YSC が作動するため横加速度とヨーレートの抑制がともに緩和し非制御時に近い値まで発生していることがわかる。シミュレーションによって VW 型 ISP の効果を確認できた。

〈4・2・2〉 可変指令値型 次に、指令値に RI を用いた VR 型 ISP について Fig. 11 にシミュレーション結果を示す。条件は VW 型と同様であるが、RSC の FB ゲインに積分制御を用いている。赤の実線が VW 型に対して、青の点線は VR 型を示している。VW 型の場合には定常誤差が発生しているのに対して、VR 型の場合には積分制御によってほぼ誤差なく指令値に追従していることがわかる。従っ

て VR 型 ISP の効果を示すことができた。

5. 実験結果

我々の研究グループは車両姿勢制御の実験検証を行うために、一人乗りの電動車両“Capacitor COMS1”を開発した。この車両は後二輪にインホイールモータを搭載し、また前輪操舵角センサ及び、ロール運動を検出するために加速度/ジャイロセンサを搭載している。車両に搭載されている上位コンピュータによってセンサ情報が蓄積され駆動力差が計算される。サンプリング周期は1msecで指令トルクがインホイールモータに入力される。Fig. 12 に車両制御システムを、Table 1 に実験車両の主要諸元を示す。

まず、RSC の有効性を外乱抑圧と指令値追従性の観点から示す。実験における再現性の問題から外乱ロールモーメントは駆動力差で実現した。そして一定速度制御下において直線走行と一定操舵角を加えている際に外乱を加えて制御効果を検証した。次に操舵角と車体速度から計算される指令値に横加加速度が追従することを、正弦波操舵実験によって確認した。

さらに ISP の有効性を示すために、一定速度制御下でステップ操舵角を加えている際の横加加速度応答とヨーレート応答及び軌跡を比較した。

〈5・1〉 RSC の実証

〈5・1・1〉 横風外乱に対するロバスト性 20 km/h 一定速度制御下で1秒後に外乱を加えた。ただし加速度情報はノイズが大きいため LPF をかけている。

Fig. 12. Control system of experimental vehicle

Table 1. Drive train specification of experimental vehicle

Category	IPMSM
Phase/Pole	3/12
Rating power/Max	0.29 kW/2 kW
Max torque	100 Nm
Max velocity	50 km/h

Fig. 13 に直線走行時の外乱抑圧性能を示す。ステップ上の外乱ロールモーメント ($0.5 \text{ m/s}^2 * h_s$ に相当) が1秒後に加えられているが非制御時及び RSC のフィードバック制御のみ作動時には、横加加速度が抑えられずにヨーレートも発生していることが分かる。一方制御時には外乱を抑制できていることが分かる。ここで横加加速度外乱が打ち消されるまで達するまでに1秒前後かかっているのは、タイヤのダイナミクスによるものである。車体に直接入るような外乱に対してはもっと早く打ち消すことが可能である。

Fig. 14 はカーブ時 (ステップステアリング操舵 240 度) において、4 秒後に外乱を加えている時の実験結果である。赤い実線は外乱が全くない状態での結果、青い点線と緑の一点鎖線は外乱が加えられた時を示している。シミュレーションと同様に、非制御時には外乱の影響を受けて横加加速度が10%程度下がってしまい、不安定な挙動を示しているのに対して、制御時には外乱がなかった時と同じように安定した走行が可能となっている。ただしステアリング操舵の再現性が難しかったため、データはそれぞれの横加加速度の最大値でそれぞれの値を正規化している。

〈5・1・2〉 指令値追従性 DOB の外乱抑圧性能が確認できたので、指令値追従性を確かめるべく正弦波ステアリング操舵の実験を行った。指令値にはノミナル横加加速度の80%となるように調整した ($\eta = 0.8$)。Fig. 15 は制御時と非制御時の結果を示す。非制御時には大きな横加加速度が出て、車体も大きく振られていたのだが、制御時には横加加速度が指令値に追従していることがわかる。これで RSC の指令値追従性能を示すことができた。

〈5・2〉 ISP の実証 ISP の効果を実験によって検証する。安全上の理由からロールオーバーさせることはできな

Fig. 13. Experimental result of RSC: Disturbance suppression at straight road drive

Fig. 14. Experimental result of RSC: Disturbance suppression at curve road driving

Fig. 15. Experimental result of RSC: tracking capability to the reference value

Fig. 17. Experimental result of ISP (var. weight and var. ref.): Step steering maneuver

Fig. 16. Experimental result of ISP (Var. weight): Step steering maneuver

いので〈4・2〉節のシミュレーションと同じ状況で、実験を行った。20 km/h 一定速度制御時に 180 deg ステップ操舵角を加えた。この検証では横加速度制御に関して RI での配分効果を示すことに重点をおいているため、横加速度指令値はノミナル値の 80% と設定し ($\eta = 0.8$)、ヨーレート指令値はノミナル値を用いた。

〈5・2・1〉 可変重み型 まず重みを RI で可変とした VW 型 ISP について Fig. 16 に実験結果を示す。まず非制御時には、横加速度の立ち上がりも早く、定常値も約 4.5 m/s^2 程度となった。一方 RSC のみを行った場合、過渡状態も定常状態も横加速度はかなり抑えられていることが分かる。さらに、VW 型 ISP 場合は過渡期はロールレートとともに RI が大きくなるために横加速度の増加は抑えられるが、定常状態では YSC が作動したため横加速度もヨーレートも非制御時と同程度となった。これによって VW 型 ISP の効果を示すことができた。

〈5・2・2〉 可変指令値型 次に、指令値に RI を用いた VR 型 ISP について Fig. 17 に実験結果を示す。条件は VW 型と同様であるが、RSC の FB ゲインに積分制御を用いて

いる。

赤の実線が VW 型に対して、青の点線は VR 型を示している。VW 型の際には YSC も作動させているため定常誤差が発生しているのに対して、VR 型の場合には積分制御によって誤差なく指令値に追従していることがわかる。従って VR 型 ISP の効果を示すことができた。

6. おわりに

本論文では、まず二自由度制御系で設計された RSC の外乱抑圧性・モデル追従性と指令値追従性を実験結果で示した。さらに駆動力差のみを制御入力とした場合に、ロール状態とヨー運動を考慮した ISP を提案した。ISP の実現法として VW 型と VR 型の考察を行った。VW 型では、一般的にゲインを下げれば応答周波数も下がり、定常誤差も表れてしまう。一方 YSC をアクティブステアリング等の他の制御入力と組み合わせて制御することを考えれば、VW 型に比べ特性方程式が変化せず定常誤差も低減できる VR 型の方が有効であることを示すことができた。

謝 辞

筆者と本研究成果は東京大学グローバル COE プログラム「セキュアライフエレクトロニクス」及び日本学術振興会の援助を受けております。

(平成 21 年 8 月 10 日受付, 平成 21 年 12 月 22 日再受付)

文 献

- (1) Y. Hori: "Future Vehicle driven by Electricity and Control-Research on Four Wheel Motored UOT Electric March II", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.51, No.5, pp.954-962 (2004-10)
- (2) H. Fujimoto, A. Tsumasaka, and T. Noguchi: "Vehicle Stability Control of Small Electric Vehicle on Snowy Road", *JSAE Review of Automotive Engineers*, Vol.27, No.2, pp.279-286 (2006-4)
- (3) National highway traffic safety administration, Safercar, <http://www.nhtsa.gov/>
- (4) E.K. Liebmenn: "Safety and Performance Enhancement: The Bosch Electronic Stability Control (ESP)", *SAE Technical Paper Series*, 2004-21-0060 (2004-10)
- (5) H.E. Tseng, et al: "Estimation of land vehicle roll and pitch angles", *Vehicle System Dynamics*, Vol.45, No.5, pp.433-443 (2007-5)
- (6) S. Mammar: "Two-Degree-of-Freedom H_∞ Optimization and Scheduling for Robust Vehicle Lateral Control", *Vehicle Systems Dynamics*, Vol.34, pp.401-422 (2000-12)
- (7) B.A. Guvenc, T. Bunte, D. Odenthal, and L. Guvenc: "Robust Two Degree-of-Freedom Vehicle Steering Controller Design", *IEEE Trans. Control Sys-*

- tems Technology, Vol.12, No.4, pp.627–636 (2004-7)
- (8) K. Kawashima, T. Uchida, and Y. Hori: “Rolling Stability Control of In-wheel Electric Vehicle Based on Two-Degree-of-Freedom Control”, The 10th International Workshop on Advanced Motion Control, pp.751–756, Trento Italy (2008-3)
 - (9) T. Umeno and Y. Hori: “Robust Speed Control of DC Servomotors Using Modern Two Degrees-of-Freedom Controller Design”, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.38, No.5, pp.363–368 (1991-10)
 - (10) B.-C. Chen and H. Peng: “Differential-Braking-Based Rollover Prevention for Sport Utility Vehicles with Human-in-the-loop Evaluations”, *Vehicle System Dynamics*, Vol.36, No.4-5, pp.359–389 (2001)
 - (11) A. Hac, et. al: “Detection of Vehicle Rollover”, SAE Technical Paper Series, 2004-01-1757, SAE World Congress (2004)
 - (12) K. Yi, et al: “Unified Chassis Control for Rollover Prevention, Maneuverability and Lateral Stability”, AVEC2008, pp.708–713 (2008-10)
 - (13) 河島清貴・内田利之・堀 洋一: 「各輪垂直抗力情報を用いた車体動的重心移動推定法」, 電学自動車研, VT-07-09, pp.51–56 (2007-4)

河 島 清 貴 (学生員) 2004 年 3 月, 東京大学工学部電気科卒業。2006 年 3 月, 同大学大学院工学系研究科電気工学専攻卒業。同大学院電気工学専攻博士課程。主として電気自動車の運動制御に関する研究に従事。

内 田 利 之 (非会員) 東京大学工学系研究科電気系工学専攻技術専門職員。実験装置の開発・改良を担当。最近では, コンバート EV, キャパシタ搭載車両, 2 関節筋駆動ロボットアームを製作。

堀 洋 一 (上級会員) 1983 年 3 月, 東京大学大学院工学系研究科電気工学専門課程博士課程修了。2000 年同専攻教授。2002 年 10 月東京大学生産技術研究所教授, 2008 年 4 月より東京大学大学院新領域創成科学研究科教授。専門は制御工学とその産業応用, 特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。現在, 電気学会産業応用部門部門長。1993 年および 2001 年, IEEE Trans. on IE 最優秀論文賞, 2000 年電気学会論文賞などを受賞。IEEE Fellow。その他, 計測自動制御学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会, 自動車技術会, 日本シミュレーション学会などの会員。