電気自動車におけるロールスタビリティ制御に

基づいた自動走行支援システム

河島清貴*1 内田利之*1 堀洋一*2

東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻*1

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*2

トラックや SUV などの、車高が高く横風の影響を受けやすい車両にとって、ロールスタビリティ制御(RSC) は非常に重要である。インホイールモータを各輪に搭載した電気自動車(EV)では、各輪の独立トルク制御が 可能であり、左右輪の駆動力差によって旋回モーメントを発生させることができ車両のヨー・ロール運動制 御が可能となる。本研究では EV における ESP(Electronic stability program)の開発を目指しており、本論文で は ESP の一部である、指令値追従性と、外乱推定をもとにした外乱抑圧性を兼ね備えた二自由度制御手法を 適用した RSC を提案し、横方向の外乱にもロバストな自動走行支援システムを示す。

Automatic Driving Assist System Based on Roll Stability Control on

Electric Vehicle

Kiyotaka Kawashima^{*1} Toshiyuki Uchida^{*1} Yoichi Hori^{*2}

Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo^{*1}

Department of Advanced Energy, Graduate School of Frontier Sciences, the University of Tokyo 2^{*2} In this paper, a novel rolling stability control (RSC) on in-wheel electric vehicle based on disturbance observer is proposed. Roll stability control (RSC) is important for trucks and SUV whose center of gravity is high, especially in case of automatic guided trucks. Electric motors have several advantages that internal combustion engines or brake actuators do not have. The electric motor which is installed in each wheel can output accurate torque in both directions very quickly and differential torque by right and left motors can realize novel RSC. In addition to the actuator advantage, two-degrees-of-freedom control based on disturbance observer is applied to RSC. Effectiveness of proposed roll stability control is verified with simulation and experimental results.

Electric vehicle, driving assist, disturbance observer, roll stability control:

1. はじめに

1-1インホイールモータ搭載電気自動車の利点 インホイール型電気モータを搭載している電気自動 車は以下のような利点を持っている(1)(2)。

・モータのトルク応答はエンジンに比べ100 倍速い

・精確なモータトルクを電流から知ることができる ・モータは出力比体積が小さく四輪それぞれにイン

ホイールモータとして搭載可能である

・モータは両回転方向にトルク出力可能である これらの電気モータの特性を生かして,電気自動車 におけるスリップ抑制制御(1)(2)や路面状態推定法(2)が 提案されている。分散配置されたインホイールモー タシステムによって駆動力差を用いたヨー/ピッチ コントロールや車体滑り角推定と制御などが提案さ れている(3)(4)。 1-2 EVにおけるElectronic stability programの開発 近年の自動車の多くはESP(Electronic stability program)もしくは、それに同等の機能を持つアクテ ィブセーフティシステムが搭載されている。我々は 電気モータの利点を生かした電気自動車における ESPの実現を目指している。Fig. 1にESPのブロック 図を示す。S1 に基づいて横方向の制御であるヨーイ ング運動、ロール運動安定化制御(YSC/RSC) や減速 時のピッチング運動制御(PSC)、また空転防止制御 (ASC) などが必要に応じて作動する。実際にPSC は 低速度域のみの作動であるが、YSC とRSCについて は状況に応じてどちらを優先して作動するか決める 必要がある。この場合S1におけるRoll index(RI:ロー ル角推定値と速度情報から作成されるロールオーバ 指標)(5) で優先度を決定する。



Fig.1 Concept of electronic stability program

RIが小さいうちは旋回性能を重視したYSCを作動させ、RIが大きくなるとロールオーバの危険性が大きくなればRSCの寄与分を増加させる。本論文では、このロール安定化制御について取り上げる。

1-3 ロール安定化制御の背景

ロール安定化制御(RSC: Rolling stability control) は 乗り心地だけでなく,特に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(National highway traffic safety administration) によれば、米国での自動車事故でロールオーバは3% に留まるにもかかわらず、死者数で見ると全体の3 割に達するとの報告があり(6)、ロールオーバが非常 に危険な事故であることが分かる。RSC システムは いくつかのメーカや大学でABS システムを用いて 開発がされている(5.7.8)。それぞれのシステムは余分な 横加速度やロールレートの発生に応じて,油圧ブレ ーキカ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。インホイールモータの 場合には両回転方向トルクともに精確に出力するこ とができ,またモータ電流を計測することによって 精確なトルク出力値が把握可能となる。アクチュエ ータの利点に加え,提案するRSC システムは外乱オ ブザーバ(DOB)をベースとした二自由度制御を適 用している。前述のようにDOB がロール/ピッチレ ート制御に用いられ,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,近年自 動車制御分野で多くの適用例が報告されている(%)。 提案手法では目標値追従性と一定速度走行時に横か らの突風などの外乱に対するロバスト性が提案する 二自由度制御によって実現される。

2. 車両モデル

本研究で用いられる車両モデルは, Magic formula を ベースとした非線形四輪モデルと線形サスペンショ ンロールモデルである。

2-1 四輪モデル

非線形タイヤモデル:横加速度はタイヤに発生する 横力によって発生する。横力はMagic formula タイヤ モデルに基づき横滑り角 β から求められる。Magic

formula 関数 $F_{v}(\beta)$ は各輪の横滑り角を用いて次の

非線形式で与えられる(10)。

$$F_{\nu}(\beta) = D\sin(C\arctan(B\beta - E(B\beta - \arctan(B\beta))))$$
(1)

四輪モデルの運動方程式:横方向と回転の運動方程 式は以下となる。

$$MV(s\beta + \gamma) = F_{vfl} + F_{vfr} + F_{vrl} + F_{vrr}$$
(2)

$$I_{yaw}s\gamma = d_{f}(-F_{xfl} + F_{xfr}) + d_{r}(-F_{xrl} + F_{xrr}) + l_{f}(F_{yfl} + F_{yfr}) - l_{r}(F_{yrl} + F_{yrr})$$
(3)

ここでM は車両重量, V は車体速度, γ はヨーレート, I_{yaw} はヨーイナーシャ, sはラプラス演算子,

 d_f, d_r はそれぞれフロントとリアタイヤのトレッ

ド距離, l_f , l_r はそれぞれ車両重心からフロントと リアシャフトまでの距離, F_{xii} , F_{yii} はそれぞれ各輪 での進行方向及び横方向のタイヤ力である。

2-2 線形サスペンションロールモデル
ロール運動方程式は次式で与えられる(11)。
-
$$Mh_sV \cdot s\beta - I_{xz}s\gamma - Mh_sV\gamma$$
 (4)
+ $(I_{roll}s^2 + C_{roll}s + K_{roll} - Mgh)\phi = 0$ (4)
ここで h_s は重心からロールセンターまでの距離,
 I_{xz} は慣性乗積, $I_{roll}, C_{roll}, K_{roll}$ はそれぞれロール
イナーシャ項, ダンピング項, ばね定数項, ϕ はロ
ール角度である。重心位置での横加速度 a_y , 横滑り
角 β, γ, V の関係式 $a_y = (s\beta + \gamma)V$ を用い, さらに
慣性乗積と重力項は, 他の項に比べて小さいため無
視するとロール運動方程式(4)は線形バネマスダン
パシステムで表される。

$$\varphi = \frac{1}{I_{roll}s^2 + C_{roll}s + K_{roll}}u_y$$

3. ロールモデルパラメータ同定

実験結果に固定トレース法を適用してロールモデル のパラメータ同定を行った(12)。式(5)から横加速度

 \hat{a}_{y} は次式となる表すことができる。

$$\hat{a}_{v}(k \mid \theta) = \hat{\theta}^{T} \xi(k) \tag{6}$$

 $\label{eq:constraint} \boldsymbol{\Sigma} \subset \boldsymbol{\tilde{\boldsymbol{\nabla}}} \boldsymbol{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{roll} & \boldsymbol{C}_{roll} & \boldsymbol{K}_{roll} \end{bmatrix}^T, \ \boldsymbol{\boldsymbol{\xi}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tilde{\boldsymbol{\phi}}} & \boldsymbol{\boldsymbol{\phi}} & \boldsymbol{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix}^T \boldsymbol{\tilde{\boldsymbol{\nabla}}} \boldsymbol{\boldsymbol{\delta}}$

る。この忘却係数によって
くが十分に情報を含んで

いる時, θ はよい精度で推定が行われ, ξ が小さ

い時, θ はほとんど更新をしなくなる。つまり,こ れはPE 性を失った際にも推定値が発散することを 防ぎ,安定した同定を行うことができる。固定トレ ース法の更新式は以下となる。

$$\varepsilon(k) = a_{v}(k) - \hat{\theta}^{T}(k-1)\xi(k)$$
(7)

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)\xi(k)}{1 + \xi^T(k)P(k-1)\xi(k)}\varepsilon(k)$$
(8)

$$P(k) = \frac{1}{\lambda(k)} \left\{ P(k-1) - \frac{P(k-1)\xi(k)\xi^{T}(k)P(k-1)}{1+\xi^{T}(k)P(k-1)\xi(k)} \right\}$$
(9)

 $\lambda(k) = 1 - \frac{|P(k-1)\xi(k)|}{1 + \xi^{T}(k)P(k)\xi(k)} \frac{1}{tr[P(0)]}$ (10)

ここで ε は出力誤差, Pは共分散行列である。この同定結果によって固有角周波数は17.2(rad/sec)であり,減衰係数は0.234(1/sec)である。Fig. 2 にセンサで観測された加速度と, ξ 及びロールパラメータ



推定値 $\hat{\theta}$ から計算された加速度を比較した結果を示 す。二つの曲線はほぼ一致し、よい精度で同定が行 われていることがわかる。

4. 二自由度制御を用いたロールスタビリティ制御

4-1 フィードバック制御による目標値追従制御 Fig.3 はフィードフォワード/フィードバック (FF/FB) をベースとしたロール安定化制御のブロッ ク線図を示す。破線の外側は実際のプラントを示し, 内側は計算機で処理される部分である。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*M*に

よってプラントに入力される。指令ロールレート

はステアリング角度と車両速度によって計算される。 FF コントローラによって遅れを補償し,追従性能 を高めることができる。ここで,システムは以下の 式で表される。

$$M^* = P_{Ma_y} a_y^* \tag{11}$$

$$a_{y} = P_{a_{y}\delta} \cdot \delta + P_{a_{y}M} \cdot M + a_{yd}$$
(12)

$$\dot{\phi} = P_{\phi a_y} \cdot a_y \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix} P_{\phi\delta} & P_{\phiM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\phi a_y} P_{a_y\delta} & P_{\phi a_y} P_{a_yM} \end{bmatrix}$$
(14)

$$\begin{bmatrix} P_{\dot{\phi}\delta}^n & P_{\dot{\phi}M}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\dot{\phi}a_y}^n P_{a_y\delta}^n & P_{\dot{\phi}a_y}^n P_{a_yM}^n \end{bmatrix}$$
(15)

ここで a_{yd} は横加速度外乱である。入力 $\dot{\phi}^*$ と δ から

出力 ϕ への伝達関数は次式のように表される。



Fig. 3. Block diagram of roll stability control based on basic FF and FB controller

$$\dot{\phi} = \frac{P_{\phi M} P_{Ma_{y}}(K_{ff} + K_{fb})}{1 + P_{\phi M} P_{Ma_{y}} K_{fb}} \cdot \dot{\phi}^{*} + \frac{P_{\phi \delta}}{1 + P_{\phi M} P_{Ma_{y}} K_{fb}} \cdot \delta$$

$$+ \frac{P_{\phi a_{y}}}{1 + P_{\phi M} P_{Ma_{y}} K_{fb}} \cdot a_{yd}$$
(16)

4-2 ロール外乱モーメントに対するロバスト性 一般的にFF とFB 制御を合わせて二自由度制御と 呼ぶことがあるが,一般的なこれらの制御器は外乱 抑圧性能を持っていない。そこで本章ではDOB を ベースとした目標値追従性能と外乱抑圧性能をもっ て二自由度制御と呼ぶことにする。提案するDOB は車両速度,ステアリング角,駆動力差,ロール角 速度と横加速度情報を用いて外部からの横加速度外 乱を推定する。推定された横加速度は次式で与えら れる。

$$\hat{a}_{yd} = \frac{1}{P_{\phi a_y}^n} (\dot{\phi} - P_{\phi a_y}^n a_y^* - P_{\phi \delta}^n \delta)$$
(17)

ここで $P_{a_{yM}}P_{Ma_{y}}=1$ と仮定すると推定外乱の式は

(18)となる。右辺第一項と第二項はモデル誤差を表し、第三項は横加速度外乱を表している。

$$\hat{a}_{yd} = \left(\frac{1}{P_{\phi a_y}^n} - \frac{1}{P_{\phi a_y}}\right) \dot{\phi} - (P_{a_y\delta}^n - P_{a_y\delta})\delta + a_{yd}$$
(18)

Fig.4 はRSC におけるDOB をベースとした二自由 度制御のブロック線図を示す。



based on DOB

DOB の部分はインナーループであり,FB ループよりも早い応答性を持つ。推定された横加速度外乱は次式によってFB される。

$$a_y^* = v - Q\hat{a}_{yd} \tag{19}$$

Q はローパスフィルタであり,次式で与えられる(13)。

$$Q = \frac{1 + \sum_{k=1}^{N-r} a_k(\varpi)^k}{1 + \sum_{k=1}^{N} a_k(\varpi)^k}$$
(20)

ここで、因果性を保つために r はノミナルモデル伝 達関数の分母多項式の次数と分子多項式の次数の差 よりも等しいか大きい必要がある。式(19)を式(17) に代入すると、

$$\dot{\phi} = P^n_{\dot{\phi}\delta}\delta + P^n_{\dot{\phi}a_w}v + P^n_{\dot{\phi}a_w}(1-Q)\hat{a}_{yd}$$
(21)

ローパスフィルタQ のカットオフ周波数よりも低 い周波数の外乱はDOB によって抑圧される。本論 文ではカットオフ周波数を20 (rad/sec) と設定して いる。式(18) より,外乱抑圧性能に加えてDOB は モデルエラーも補償するため,カットオフ周波数よ りも十分に低い周波数領域ではプラントはノミナル モデルのように振舞う。

4-3 モデル誤差に対するロバスト性 モデルエラーによってシステムが不安定になる可能 性があるため、安定性解析を行う必要がある。ここ で制御器*K*,実際のプラントモデル*P_a*とし,FB 閉 回路を考える。乗法型モデルエラー Δ を用いると実 際のシステムは*P_a* = *P_n*(1+ Δ)となる。ここで*P_n*はノ ミナルモデルの伝達関数である。Fig. 5にナイキスト 線図を用いたモデル変動における安定余裕を示す。 円がモデルの変動を表しており、これが-1を含むと 分母が0となりシステムは不安定となる。



Fig. 5. Gain and phase margin (Nyquist plot)

DOB をインナーループに組み込んだFB 閉回路を 考えると、DOB を含めた等価制御器 K_{eq} は式(22) で 与えられる(14)。

$$K_{eq} = \frac{K + \frac{Q}{P_n}}{1 - Q}$$
(22)

従って,この場合のロバスト安定条件は補感度関数 を用いて以下となる。

$$|T_{neq}| = \left| \frac{K_{eq} P_n}{1 + K_{eq} P_n} \right| = \left| \frac{K P_n + Q}{1 + K P_n} \right| < \left| \frac{1}{\Delta} \right|$$
(23)

式(24) が成立するように制御器*K* とローパスフィ ルタ*Q*を選定する必要がある。この条件をボーデ線 図上で表すとFig.6となる。



Fig. 6. Robust stability for model error

それぞれの曲線はロールモデルのパラメータ I_n, C_n, K_n が変動したときの $1/\Delta$ を示している。モデルパラメータのうち I_n と K_n は約6割以上のモデルエラーが存在するとシステムが不安定となること

がわかる。従ってモデル同定精度が非常に重要となる。

5. シミュレーションと実験結果

5-1 実験環境

我々の研究グループは一人乗りの実験電動車両 "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、またステアリング角 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1 (msec) で指令トルクがインホイールモータに入力 される。実験車両は車高が比較的高いため本ロール 制御実験に非常に適している。

5-2 RSC におけるロール抑圧性能

Fig. 7にロールレート指令値を意図的にノミナル値 の半分にした場合の実験結果を示す。縦軸は LTR(Load transfer ratio)と呼ばれ、車体重心の位置を 表す指標で絶対値1以下の値をとる。LTRは加速度情 報を用いて以下のように示される。

$$LTR = \frac{F_{zfl} - F_{zfr} + F_{zrl} - F_{zrr}}{F_{zfl} + F_{zfr} + F_{zrl} + F_{zrr}}$$
(24)

非制御時は激しく重心移動し、ピークが立ってい るが制御時にはそれが抑えられより安定した旋回が 可能となっている。



Fig. 7. Experimental result of following capability

5-3 RSC における外乱抑圧性能

ここでは外乱抑圧性能結果を示す。横からの突風が 吹いたものと仮定して6(rad/sec)の正弦波を外乱と して入力している。またここでは運転者は外乱が入 力されたときもステアリング角を0度に保持するこ とを想定している。Fig. 8(a)(b)において、ドライブ 回路のトルク制限によって完全な抑圧はできていな いが、DOB によって横加速度外乱が抑圧されてい ることが分かる。現在ロールレートを用いてDOBを 構成しているが、ロールのダイナミクスが入るため 一旦ロールが発生してしまうと駆動力差で押さえ込 むには限界がある。今後ロールのダイナミクスを含 まない横加速度を用いたロール安定化制御を行なっ ていく予定である。



Fig. 8. Simulation result of disturbance suppression

6. おわりに

本論文では,自動走行支援のための二自由度制御手 法を用いたロール安定化制御(RSC)を提案した。四 輪非線形車両モデルと線形サスペンションモデルを 用いたシミュレーションを構築し,提案手法の有効 性を検証した。さらに固定トレース法を用いたロー ルモデルパラメータ同定を行い,安定したパラメー タ推定を行えることを示した。モデルエラーを考え ることによって外乱オブザーバを適用した場合のロ バスト安定条件を示した。さらに実験結果によって, 提案する二自由度制御,つまり目標値追従性能と外 乱抑圧性能を持つことを示し,本手法の有効性を確 認した。しかし現在外乱抑圧性能は小さいため、今 後横加速度情報をもとに外乱推定を行いロール安定 化制御につなげていきたいと考えている。

謝辞

筆者とこの実験成果は独立行政法人日本学術振興会 によって援助を受けております。また本論文で用い ている車両シミュレーションは坂井真一郎博士が開 発したものをベースとして使用しており,同氏に深 く感謝しております。また実験車両に搭載の電気二 重層キャパシタについて日清紡株式会社様にはお世 話になり大変感謝しております。

文献

(1)Yoichi Hori, "Future Vehicle driven by Electricity and Control-Research on Four Wheel Motored UOT Electric March II", IEEE Transaction on Industrial Electronics,

Vol.51, No.5, pp.954-962, 2004.10

(2)Shinichiro Sakai, et al., "Novel skid detection method without vehicle chassis speed for electric vehicle", JSAE Review, Vol.21, No.4, pp.503-510, 2000.10

(3)Hiroshi Fujimoto, et al., "Motion Control of Electric Vehicle Based on Cornering Stiffness Estimation with Yaw-moment Observer", 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, Istanbul Turkey, pp. 206-211, 2006.03

(4)佐藤慎介,藤本博志,"インホイールモータを搭載 した電気自動車によるピッチング制御法の提案", 平成19 年電気学会産業計測制御研究会,IIC-07-81, pp.65-70, 2007.03

(5) B. Chen and H. Peng, "Differential braking based rollover prevention for sport utility vehicles with human-in-the-loop evaluations," Vehicle System Dyanmics, Vol. 36, No. 4-5, pp. 359-389, 2001
(6)NHTSA, Safercar program, <u>http://www.nhtsa.gov/</u>
(7)Kyongsu Yi, et al, "Unified Chassis Control for Rollover Prevention, Maneuverability and Lateral

Stability", AVEC2008 2008.10

(8)T. Brown, et al., "Roll over stability control for an automotive vehicle", Ford Global Technologies, Inc., U.S. Patent No. 6324446, 2001.11

(9)Bilin Aksun Guvenc, Tilman Bunte, Dirk Odenthal and Levent Guvenc, "Robust Two Degree-of-Freedom Vehicle Steering Controller Design", IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol. 12, No. 4, pp.627-636, 2004.07

(10)Hans B. Pacejka, et al., "The Magic Formula Tyre Model", Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 21, No. 1, PP.1-18, 1992.01

(11)阿部正人,"自動車の運動と制御,山海堂, 1992.03

(12)堀洋一, 大西公平, 応用制御工学, 丸善出版, pp.108-109, 1998.02

(13)Takaji Umeno, Yoichi Hori, "Robust Speed Control of DC Servomotors Using Modern Two

Degrees-of-Freedom Controller Design", IEEE

Transaction Industrial Electronics, Vol.38, No. 5, pp.363-368, 1991.10

(14)Masayoshi Tomizuka, "Advanced Control Systems II", Class Notes for ME233 pp. DOB1-10, Mechanical Engineering UC Berkeley, 2007 spring