論　文

インホイールモータ搭載電気自動車における二自由度制御系によるロールスタビリティ制御

学生員　河島　清貴*　　非 会 員　内田　利之*
非会員　富塚　誠義**　　上級会員　堀　　洋一***

Rolling Stability Control of In-wheel Electric Vehicle Based on Two-Degrees-of-Freedom Control

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

In this paper, a novel rolling stability control (RSC) on in-wheel electric vehicle based on disturbance observer is proposed. Electric motors have several advantages that internal combustion engines or brake actuators do not have. The electric motor that is installed in each wheel can output accurate torque in both directions very quickly, 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. The proposed method realizes following capability to command value and robustness to lateral acceleration disturbance. In the second section, vehicle model with nonlinear tire model and linear roll model is introduced. In the third section, roll model identification with experimental result is shown. The forth section introduces proposed RSC system and describes robust stability condition and simulation result shows how model error violates stability condition. Effectiveness of proposed roll stability control is verified with simulation and experimental results utilizing our electric vehicle in the fifth section.

キーワード：電気自動車，二自由度制御，ロールスタビリティ制御，外乱オブザーバ
Keywords: Electric vehicle, Two-degrees-of-freedom control, Roll stability control, Disturbance observer

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　これまでに我々の研究グループが指摘してきたように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 10-100 倍速い。
- 精確なモータトルクを電流値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。

* 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, University of Tokyo
7-3-1 Hongo Bunkyo Tokyo 113-8656
** カリフォルニア大学バークレイ校機械工学科
Mechanical Engineering, University of California Berkeley
5100B Etcheverry Hall Berkeley, CA 94720
*** 東京大学生産技術研究所
〒 185-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1
Institute of Industrial Science, University of Tokyo
4-6-1 Komaba Meguro Tokyo 153-8505

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〉 研究の背景　ロール安定化制御 (Rolling stability control:RSC) 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。垂直抗力の不均等によって乗り心地の悪化だけでなく，タイヤスリップを発生し危険に陥る可能性がある。RSC システムは複数の自動車メーカや部品メーカ等で ABS システムを用いて開発がされている[(5)-(7)]。それぞれのシステムは急激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。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 [8] - [9]。提案手法では目標値追従性と横からの突風や路面バンク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 $F_y(\beta)$ 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]。

$$F_y(\beta) = Dsin(Carctan(B\beta - E(B\beta - arctan(B\beta)))) \quad (1)$$

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。

$$MV(s\beta + r) = F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr} \cdots\cdots\cdots (2)$$

$$I_{yaw}sr = d_f(-F_{xfl} + F_{xfr}) + d_r(-F_{xrl} + F_{xrr}) \quad (3)$$

$$+l_f(F_{yfl} + F_{yfr}) - l_r(F_{yrl} + F_{yrr}). \cdot \quad (4)$$

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]。

$$-Mh_sVs\beta - I_{xz}s\gamma - Mh_sV\gamma$$

$$+(I_{roll}s^2 + C_{roll}s + K_{roll} - Mgh)\phi = 0. \cdots\cdots (5)$$

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 (5) は線形バネマスダンパシステムで表される。

$$\phi = \frac{Mh_s}{I_{roll}s^2 + C_{roll}s + K_{roll}}a_y \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

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 (6) から横加速度 $\hat{y}$ は次式となる表すことができる。

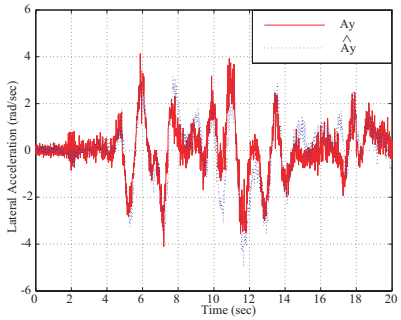


Fig. 1. Experimental result of roll model parameter identification

$$\hat{y}(k|\theta) = \hat{\theta}^T\zeta(k). \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

ここで $\theta = \begin{bmatrix} I_{roll} & C_{roll} & K_{roll} \end{bmatrix}^T$, $\zeta = \begin{bmatrix} \ddot{\phi} & \dot{\phi} & \phi \end{bmatrix}^T$ である。この忘却係数によって ζ 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，ζ 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。

$$\epsilon(k) = y(k) - \hat{\theta}^T(k-1)\zeta(k), \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)\zeta(k)}{1 + \zeta^T(k)P(k-1)\zeta(k)}\epsilon(k), \cdots\cdots (9)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda}(P(k-1) - \frac{P(k-1)\zeta(k)\zeta^T(k)P(k-1)}{1 + \zeta^T(k)P(k-1)\zeta(k)}), \quad (10)$$

$$\lambda(k) = 1 - \frac{|P(k-1)\zeta(k)|}{1 + \zeta^T(k)P(k)\zeta(k)}\frac{1}{tr[P(0)]}. \cdots\cdots\cdots\cdots (11)$$

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. 1 にセンサで観測された加速度と，ζ 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. 2 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 $\dot{\phi}^*$ 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。

$$M^* = P_{Ma_y}a_y^*, \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12)$$

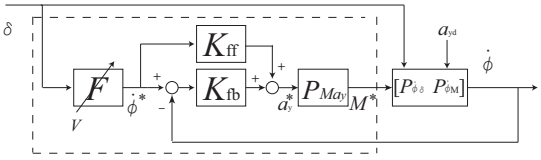


Fig. 2. Block diagram of roll stability control based on basic FF and FB controller

$$a_y = P_{a_y\delta}\delta + P_{a_yM}M^* + a_{yd}, \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (13)$$
$$\dot{\phi} = P_{\dot{\phi}a_y}a_y, \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (14)$$

$$\begin{bmatrix} P_{\dot{\phi}\delta} & P_{\dot{\phi}M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\dot{\phi}a_y}P_{a_y\delta} & P_{\dot{\phi}a_y}P_{a_yM} \end{bmatrix}, (15)$$
$$\begin{bmatrix} P^n_{\dot{\phi}\delta} & P^n_{\dot{\phi}M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^n_{\dot{\phi}a_y}P^n_{a_y\delta} & P^n_{\dot{\phi}a_y}P^n_{a_yM} \end{bmatrix}. (16)$$

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 $\dot{\phi}$ への伝達関数は次式のように表される。

$$\dot{\phi} = \frac{P_{\dot{\phi}M}P_{Ma_y}(K_{ff}+K_{fb})}{1+P_{\dot{\phi}M}P_{Ma_y}K_{fb}}\dot{\phi}^* + \frac{P_{\dot{\phi}\delta}}{1+P_{\dot{\phi}M}P_{Ma_y}K_{fb}}\delta + \frac{P_{\dot{\phi}a_y}}{1+P_{\dot{\phi}M}P_{Ma_y}K_{fb}}a_{yd}. \cdots\cdots\cdots\cdots (17)$$

〈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。

$$\hat{a}_{yd} = \frac{1}{P^n_{\dot{\phi}a_y}}(\dot{\phi} - P^n_{\dot{\phi}a_y}a^*_y - P^n_{\dot{\phi}\delta}\delta) \cdots\cdots\cdots (18)$$

ここで $P_{a_yM}P_{Ma_y} = 1$ と仮定すると外乱の式は (19) 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。

$$\hat{a}_{yd} = (\frac{1}{P^n_{\dot{\phi}a_y}} - \frac{1}{P_{\dot{\phi}a_y}})\dot{\phi} - (P^n_{a_y\delta} - P_{a_y\delta})\delta + a_{yd}. (19)$$

Fig. 3 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。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。

$$a^*_y = v - Q\hat{a}_{yd} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (20)$$

Q はローパスフィルタであり，次式で与えられる [13]。

$$Q = \frac{1+\sum_{k=1}^{N-r}a_k(\tau s)^k}{1+\sum_{k=1}^{N}a_k(\tau s)^k} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (21)$$

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 (20) を式 (18) に代入すると，

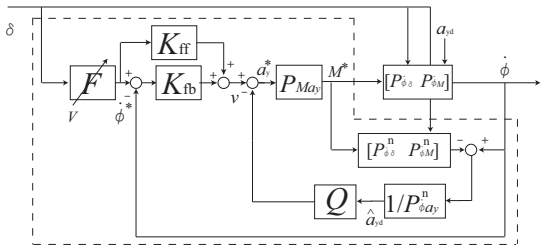


Fig. 3. Block diagram of 2-DOF for RSC based on DOB

$$\dot{\phi} = P^n_{\dot{\phi}\delta}\delta + P^n_{\dot{\phi}M}P^n_{Ma_y}v + P^n_{\dot{\phi}a_y}(1-Q)\hat{a}_{yd}. \cdot (22)$$

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 (19) 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 DOB をシステムに適用するにあたり安定性解析を行うことは非常に重要である。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 $P_a = P_n(1+\Delta)$ となる。ここで P_n はノミナルモデルの伝達関数である。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 (23) で与えられる [14]。

$$K_{eq} = \frac{K + \frac{Q}{P_n}}{1-Q} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (23)$$

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。

$$|T_{neq}| = |\frac{K_{eq}P_n}{1+K_{eq}P_n}| = |\frac{KP_n+Q}{1+KP_n}| < |\frac{1}{\Delta}|. \cdot (24)$$

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. 4 となる。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 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。

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

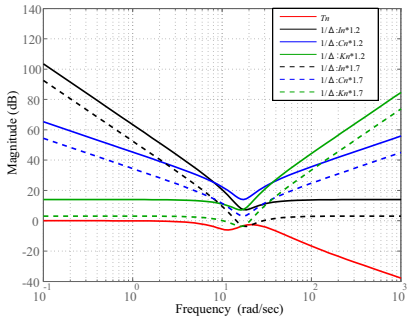
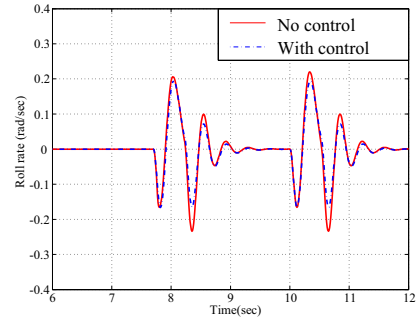
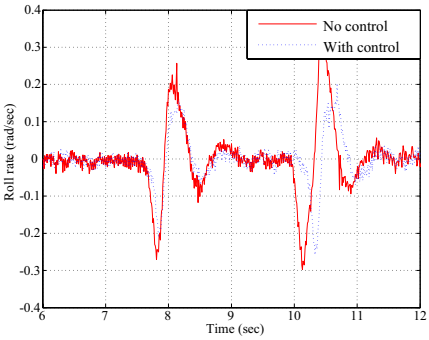


Fig. 4. Robust stability for model error



(a)Simulation result



(a)Experimental result

Fig. 5. Simulation result of disturbance suppression

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. 5(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。シミュレーション結果と実験結果によって提案する二自由度制御系の外乱に対するロバスト性が示された。

6. ま と め

本論文では，電気モータの利点に基づき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。

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） H. Nakashima, et al., ”Vehicle motion control system”, Aisin Seiki Co., LTD., U.S. Patent No. 5869943, 2002.02
（6） T. Brown, et al., ”Roll over stability control for an automotive vehicle”, Ford Global Technologies, Inc., U.S. Patent No. 6324446, 2001.11
（7） H. Nishizawa et al., ”Braking force distribution control system and method”, Nisshinbo Industries, Inc., U.S. Patent No. 6276767, 2001.08
（8） Kiyotaka Kawashima, Toshiyuki Uchida, Yoichi 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, 2008.03
（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