電気自動車のトラクションコントロールに関する基礎研究

非会員 鶴岡 慶雅 (東京大学)
 非会員 豊田 靖 (日立製作所)
 正員 堀 洋一 (東京大学)

Basic Study on Traction Control of Electric Vehicle

Yoshimasa Tsuruoka, Non-member (The University of Tokyo),
 Yasushi Toyoda, Non-member (Hitachi Ltd.)
 and Yoichi Hori, Member (The University of Tokyo)

Recent researches of electric vehicle are normally focused on batteries and motors themselves. However electric vehicle can achieve high performance motion control by taking advantage of its excellent controllability. In this paper, we propose "traction control". First, we clarify the static characteristic of vehicle slip phenomena by introducing "constant slip ratio curve". Next, we propose "model following control" and "slip ratio control" and show their effectiveness by experiments using a real test vehicle.

キーワード：電気自動車，トラクションコントロール，モデル追従制御，スリップ率制御，定スリップ率曲線，モーションコントロール

1. まえがき

従来，電気自動車の研究では，バッテリーの改善や回生ブレーキによる一充電走行距離の向上，モータの性能改善といったことに主眼がおかれているが，その高い制御性を活かすことによってガソリン自動車にはできない高度な運動制御が可能であるということは意外に知られていない。

本研究では電気自動車の運動制御として，駆動時のスリップ防止制御であるトラクションコントロールをとりあげる。トラクションコントロールは，ガソリン自動車では一部の高級乗用車などで既に実用化されているが，付加ハードウェアが必要なためコストが高かったり，エンジンの応答が遅いために性能的に不十分であるなど不満な点が多い。電気自動車であれば，モータトルクの制御，すなわちソフトウェアだけで，ガソリン自動車よりも高性能なトラクションコントロールが実現できる可能性がある。

本論文では，最初にモータトルクとスリップ率との関係を明らかにし，それをふまえて電気自動車のトラクションコントロールとしてモデル追従制御とスリップ率制御を提案し，その有効性を実験によって示す。

2. スリップ現象

<2.1> 路面とタイヤの摩擦力

路面とタイヤの間に発生する摩擦力には，タイヤの前後方向に発生する前後力と，車両の進行方向と直角に作用する横抗力とがあり，これらは図 1 に示すとおり，スリッ

プ率 λ の関数として表される。ただし，スリップ率とは次式で定義される駆動輪速度 V_w と車体速度 V の関数である。

$$\lambda = \frac{V_w - V}{V_w} \quad (1)$$

図 1 から，スリップが発生してスリップ率が大きくなると，前後力・横抗力ともに減少することがわかる。特に横抗力の減少は，駆動輪の横方向のグリップ力を失わせるため，車両の走行安定性に著しく悪影響をおよぼす。トラクションコントロールとは，そのような危険な状態を防止し，さらに駆動力を確保して加速性能を向上させるために，スリップ率を前後力・横抗力ともに確保できるような適正な範囲以内に制限する制御といえる。

図 1 の前後力の曲線は，トラクションコントロールを考える上で重要な曲線である。以後この曲線を $\mu-\lambda$ 曲線と呼ぶ。

図 1 路面とタイヤの間に働く摩擦力
 Fig.1. Friction force between road and tire

<2.2> スリップ率の平衡点

電気自動車は、正確なトルク制御ができるという点でガソリン自動車と大きく異なっている。しかし単純なトルク制御は、雪上路などの滑りやすい路面において、急激なスリップ率の増加を起こしてしまうということには注意する必要がある。

本節では、トラクションコントロールの制御方式を考える足がかりとして、モータの発生トルクとスリップ率の平衡点との関係を明らかにする。

以下、車両の前後方向の運動のみに限定して解析を行う。解析を容易にするため、次の仮定をおく。

- 左右の車輪の摩擦係数、モータトルクは等しい。
- ころがり抵抗、空気抵抗は十分小さい。

すると、車輪および車体の運動方程式は、

$$(F_m - F_d) \frac{1}{M_w s} = V_w \quad (2)$$

$$F_d \frac{1}{Ms} = V \quad (3)$$

となる。ただし、 F_m ：モータトルクの力換算値、 F_d ：路面とタイヤの摩擦係数、 M_w ：車軸慣性モーメントの重量換算値、 M ：車体重量、 s ：ラプラス演算子である。

路面とタイヤの摩擦係数は、摩擦係数 μ に垂直抗力 N をかけて得られるので、次のようになる。

$$F_d = N\mu(\lambda) \quad (4)$$

これら(2)、(3)、(4)式によって得られる自動車モデルをブロック図で示すと、図2のようになる。

ここで、スリップ率がある値 λ_0 で平衡状態となるような F_m と F_d の関係を求める。(2)、(3)式の微分形を両辺割って、

$$\frac{F_m - F_d}{F_d} = \frac{M_w}{M} \frac{dV_w}{dV} \quad (5)$$

なる関係が得られる。ここで、スリップ率が平衡状態ということとは、(1)式より、

$$\frac{dV_w}{dV} = \frac{V_w}{V} = \frac{1}{1 - \lambda_0} \quad (6)$$

であるから、これを(5)式に代入し、さらに(4)式の関係を用いて摩擦係数 μ について解くと、

$$\mu = \frac{F_m}{N} \left(1 - \frac{\frac{M_w}{M} \frac{1 + \frac{M_w}{M}}{1 + \frac{M_w}{M} \frac{1}{1 - \lambda_0}}}{1 + \frac{M_w}{M} \frac{1}{1 - \lambda_0}} \right) \quad (7)$$

を得る。すなわち、 F_m を固定して λ_0 の関数としてみれば、縦軸は F_m/N 、横軸は $1 + M_w/M$ を漸近線とする双曲線となる。この曲線は、スリップ率を変化させない仮想的な摩擦係数を表しており、以後「定スリップ率曲線」と呼ぶ。

定スリップ率曲線を $\mu-\lambda$ 曲線と重ね合わせることで、あるモータトルクにおけるスリップ率の平衡点が、2つの曲線の交点として得られる。

ここで、電気自動車が実際にトルク制御をした場合にス

リップ率がどのように変化するかを見てみよう。 $\mu-\lambda$ 曲線としては、雪道などの滑りやすい路面などに多く見られる図3のようなものを用いる。まず、定スリップ率曲線はモータトルクの変化によって、

(ア) → (イ) → (ウ) → (イ) → (ア)

と変化したとする。このとき、各々のトルクに対応するスリップ率の平衡点は、

A → B → E → D → A

と変化する。この結果から次に述べる2つの注目すべきことが分かる。

- 定スリップ率曲線が(イ)から(ウ)に変化する、すなわち(近似的には)モータトルクが摩擦力のピークを超えることによって、スリップ率は急激に増大する(BからE)。
- 定スリップ率曲線が(ウ)から(イ)に変化しても、スリップ率の平衡点はEからDに移るだけで、スリップ率はほとんど減少しない。つまり、一度スリップ率の平衡点が摩擦力のピークを超えて大きくなってしまえば、少しトルクを落としたぐらいではスリップ状態から回復できない。

図2 自動車モデル

Fig.2. Vehicle model

図3 スリップ率の平衡点の推移

Fig.3. Change of equilibrium point of slip ratio

3. モデル追従制御

図4 モデル追従制御の制御ブロック図

Fig.4. Block diagram of model following control

前章において、スリップ状態から回復するためには、モータトルクを大幅に削減しなければいけないということが明らかになった。そこでまず、スリップしたときにトルクを減少させるような制御をモデル追従制御で実現する。

図4に制御ブロック図を示す。図中の規範モデルを乾燥路面走行時の車体特性としておけば、滑りやすい路面でもスリップを起こさずに走行できると期待される。本論文では、規範モデルは事前の乾燥路面走行実験から求めた1

慣性系とする。また、制御の目的は駆動輪のスリップ時にトルクを減少させることであるので、リミッタによってトルクを増やす指令は通さないようにしている。

スリップ発生時には、駆動輪速度を一次のハイパスフィルタ(HPF)に通して得られた実加速度と、規範モデルからの速度参照値をHPFに通して得られた加速度参照値との間に差が生じるので、そのフィードバックによって電流指令値(I_{com})が減少してスリップから回復することができる。

本手法のスリップ防止効果を調べるため、トルク(電流)制御のみの場合と本手法とでスリップの様子を比較する実験を行なった。滑りやすい路面として、自動車のスタート地点から約0.5m前方に長さ0.8mの鉄板を敷き、さらにその上に水をまいておく。ドライバーからのアクセル指令(電流指令)は300A一定とした。実験結果を図5に示す。始動後およそ1.25sec後に、鉄板上でスリップが起こっているが、モデル追従制御では振動を起こしながらも平均的には電流を減少させていることがわかる。それによってモータ回転数の急上昇も抑えられている。スリップ率の時間変化について比較すると、電流制御のみでは0.4まで上昇するのに対して、モデル追従制御ではピーク値で0.1程度に抑えられることがわかり、その基本的な有効性が確認された。

図5 モデル追従制御の実験結果(実験用電気自動車を用いた実車走行による)

Fig.5. Experimental results of model following control

4. スリップ率制御

前章において、電気自動車の基礎的なトラクションコントロールとしてモデル追従制御でのスリップ防止効果が確かめられた。しかしモデル追従制御は、いわばラフな制御であり、その制御によってスリップ率が適正な範囲に収まるかどうかは必ずしも明確ではない。

図6 スリップ率制御のブロック図

Fig.6. Block diagram of slip ratio control

そこで一步進めたトラクションコントロール法として、図6に示すようなスリップ率制御を中心としたトラクションコントロールを提案する。このトラクションコントロールの核をなすのは、スリップ率を目標スリップ率に追従させるようなトルク指令を出すスリップ率制御器である。目標スリップ率を図1の斜線部分で示したスリップ率とすれば、スリップ率はスリップ率制御器によって適正な値に保持されることになる。しかしトラクションコントロールはスリップ率を制限するのが目的であるので、実際にはドライバーのトルク指令とスリップ率制御器のトルク指令のうち小さい方をモータに適用する。

さて、ここまで目標スリップ率は、図1の斜線部分のようなスリップ率としてきたが、実際には、そのようなスリップ率は路面やタイヤの種類によって大きく変化する。したがって、どんな路面においても最適なトラクションコントロールを実現するためには、その路面に応じた目標スリップ率を推定する必要がある。その手法については稿をあらためて報告したいが、本論文では触れないこととする。なお、現在実用化されているガソリン車のトラクションコントロールシステムでは、目標スリップ率は0.1~0.15に固定しているものが多いが、路面状態を推定して、目標スリップ率を可変にしているものもある。

<4.1> スリップ率制御器の設計

スリップ率を目標スリップ率に追従させるスリップ率制御器を設計する。

制御器を設計するためには、制御対象のダイナミクスを調べる必要がある。そこでまず、モータトルクからスリップ率までの伝達関数を求めてみる。

(1)式の全微分をとって線形化すると、

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= \frac{\partial\lambda}{\partial V}\Delta V + \frac{\partial\lambda}{\partial V_w}\Delta V_w \\ &= -\frac{1}{V_{w0}}\Delta V + \frac{V_0}{V_{w0}^2}\Delta V_w\end{aligned}\quad (8)$$

となる。ただし、 V_{w0} 、 V_0 は、それぞれ駆動輪速度、車体速度の動作点である。摩擦力に関しては、動作点となるスリップ率の近傍の傾きを a とすると、次のようになる。

$$\Delta\mu = a\Delta\lambda \quad (9)$$

以上の線形化と、(2)、(3)、(4)式より、 ΔF_m から $\Delta\lambda$ までの伝達関数は

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta F_m} = \frac{1-\lambda_0}{aN_e} \frac{1}{1+\tau_r s} \quad (10)$$

ただし、

$$\tau_r = \frac{M_w V_{w0}}{aN_e}, \quad \frac{1}{N_e} = \frac{1}{N} \frac{M}{M_w + M(1-\lambda_0)} \quad (11), (12)$$

である。すなわち、時定数が駆動輪速度に比例する一次遅れ形の伝達関数となる。

図7 スリップ率制御ブロック図

Fig.7. Block diagram of slip ratio control

ここで制御器として(10)式の極を相殺するような可変ゲインのPI制御器、すなわち

$$C(s) = K \frac{1+\tau_r s}{s} = K\tau_r + \frac{K}{s} \quad (13)$$

を用いると(図7)、全体の伝達関数は、

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda^*} = \frac{1}{1 + \frac{aN_e}{K(1-\lambda_0)}s} \quad (14)$$

となり、 $\lambda \ll 1$ であれば、全速度域にわたって任意の時定数の一次遅れとなる制御ができることがわかる。

制御対象がノミナル値と異なる場合、制御器の零点によって制御対象の極を完全には相殺できないため、全体の伝達関数は(14)式と異なり次のようになる。

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda^*} = \frac{\left(1 + \frac{M_w V_{w0}}{a_n N_e} s\right) (1-\lambda_0) K}{M_w V_{w0} s^2 + \left\{a_r N_e + \frac{M_w V_{w0}}{a_n N_e} (1-\lambda_0) K\right\} s + (1-\lambda_0) K} \quad (15)$$

ただし、ノミナル値との相違は $\mu-\lambda$ 曲線の傾き a で代表させ、ノミナル値を $a_n=1.0$ 、実際の値を a_r とした。この場合の安定条件は、

$$KV_{w0} > -\frac{N_e^2}{M_w(1-\lambda_0)} a_r \quad (16)$$

となり、 a_r が正であれば明らかに安定である。 a_r が負であれば K と V_{w0} が(16)式の条件を満たす範囲で安定となる。

図 8 に, $a_r = -1$, $V_{w0} = 10[m/s]$ として, K を変化させたときの根軌跡を示す. K が大きくなるにつれて根が左半平面に移って安定になる様子がわかる. 図 9 に, $K = 6.7 \times 10^4$, $V_{w0} = 10[m/s]$ として, a_r を変化させたときの根軌跡を示す. a_r が負の方向に大きくなると不安定になっていく様子がわかる.

実際には, 目標値応答の時定数が 50ms 程度になるような K にした場合, $a_r = -1$ でも駆動輪速度が約 1m/s 以上で安定になるので, 実用の動作範囲のほとんどの領域で安定となることがわかる.

図 8 ゲインの変化による根軌跡
Fig.8. Root locus to change of K

図 9 a_r の変化による根軌跡
Fig.9. Root locus to change of a_r

<4.2> スリップ率制御の実験

前節で設計したスリップ率制御を, 目標スリップ率が 0.1, $\mu-\lambda$ 曲線の傾きのノミナル値を 1.0, 目標値応答の時定数を 50ms となるようにして実験を行った結果を図 10 に示す. スリップ率が 0 付近では $\mu-\lambda$ 曲線の傾きがノミナル値より大きいため, 目標値スリップ率に対する応答が遅くなっているが, その点をのぞけば良好な制御ができていることがわかる.

(a) 駆動輪速度 (上) と車体速度 (下)
(a) wheel velocity(upper) and vehicle velocity(lower)

(b) スリップ率
(b) slip ratio

(c) モータ電流
(c) motor current

図 10 スリップ率制御の実験結果
(実験用電気自動車を用いた実車走行による)
Fig.10. Experimental results of slip ratio control

5. むすび

本論文の特長をまとめると次のようになる。

- (1) 摩擦力という非線形要素を含むために解析が困難であった自動車のスリップ現象を、「定スリップ率曲線」を導入することによりその特性を明らかにした。
- (2) 電気自動車の基本的なトラクションコントロールとして、モデル追従制御を提案し、そのスリップ防止効果を実験によって示した。
- (3) どのような場合でもスリップ率を適正な範囲に制限するために、スリップ率制御を中心としたトラクションコントロール法を提案し、その有効性を実験によって示した。

今後の課題としては、スリップ率制御のさらなるロバスト化や、路面状態推定器の実装があげられる。特に、オンラインでの路面状態の推定は非常に難しく、ノイズや推定器のパラメータをどう設定するかなど問題が多い。路面状態の推定に関しては本論文では触れなかったが、我々は固定トレース法を用いた最適なスリップ率の推定法を開発中であることを付記する⁽¹⁴⁾。

(平成 9 年 5 月 25 日受付)

文献

- (1) 伊藤ほか：「トラクションコントロールシステムの現状と動向」，自動車技術，Vol.46, No.2, pp.32-37, 1992
- (2) 池田ほか：「トラクションコントロールシステムの動向」，自動車技術，Vol.42, No.3, pp.336-341, 1988
- (3) 白石ほか：「駆動制御による望ましい車両運動制御について」，自動車技術，Vol.45, No.3, pp.96-105, 1991
- (4) 峯岸ほか：「トラクションコントロールシステムの開発」，自動車技術，Vol.42, No.8, 1988
- (5) Kiyotaka Ise et al: "The "Lexus" Traction Control (TRAC) System", SAE Paper 900212, pp.319-326, 1990
- (6) 藤田ほか：「車両総合制御システムの開発」，TOYOTA Technical Review, Vol.43, No.1 May, 1993
- (7) 磯田ほか：「三菱トラクションコントロールシステム (TCL) とシャシ総合制御」，三菱自動車 テクニカルレビュー，No.3, pp.22-36, 1990
- (8) 古川修：「車両運動性能」，自動車技術 (年鑑)，Vol.49, No.8, pp.148-151, 1995
- (9) 日本エービーエス株式会社編：「自動車用 ABS の研究」，山海堂，1993
- (10) 横浜ゴム株式会社編：「自動車用タイヤの研究」，山海堂
- (11) 酒井秀男：「タイヤ工学」，グランプリ出版，1987
- (12) T. Furuya, Y. Toyoda and Y. Hori: "Implementation of Advanced Adhesion Control for Electric Vehicle", Proc. IEEE Workshop on Advanced Motion Control, AMC-Mie'96, Vol.2, pp. 430-435, 1996
- (13) 古谷ほか：「電気自動車の増粘着制御—東大三月号(UOT Electric March)の設計と制作—」，SEV/電気自動車研究会，1995
- (14) 鶴岡慶雅，豊田靖，堀洋一：「路面状態推定を用いた電気

自動車のトラクションコントロール」，電気学会産業計測制御研究会，IIC-97-22, 1997

- (15) 鶴岡慶雅，豊田靖，堀洋一：「スリップ率制御による電気自動車のトラクションコントロール」，平成 9 年電気学会全国大会，No. 983, 1997

- (16) Yoichi Hori, Yasushi Toyoda and Yoshimasa Tsuruoka: "Traction control of Electric Vehicle based on the Estimation of Road Surface Condition", PCC-Nagaoka, 1997

(付録) 実験用電気自動車

本論文の実験は、市販のガソリン自動車をコンバートした実験用電気自動車によって行われた。チョップパへの指令電圧を制御し、電流制御からスリップ率制御まで、すべてノートパソコンで制御している⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

図 11 実験用電気自動車の制御系ハードウェア構成
Fig.11. Hardware composition of electric vehicle for experiments

鶴岡 慶雅 (非会員) 平成 9 年東京大学工学部電気工学科卒業，同年，同大学院修士課程電子情報工学専攻進学，現在に至る。

豊田 靖 (非会員) 平成 7 年東京大学工学部電気工学科卒業，平成 9 年同大学院修士課程修了。同年，日立製作所 (株) に入社。

堀 洋一 (正員) 昭和 53 年東京大学工学部電気工学科卒業，昭和 58 年博士課程修了。助手，講師を経て昭和 63 年より同電気工学科助教授。制御工学とその産業応用，特に，モーションコントロール，メカトロニクスなどの分野への応用研究に従事。計測自動制御学会，IEEE，日本ロボット学会，システム制御情報学会，日本機械学会などの会員。