

モータの逆起電力を用いた電気自動車のスリップ抑制制御

小玉 晋也, 李 練兵, 堀 洋一 (東京大学)

Back-EMF based Slip Prevention Controller for EV utilizing Characteristics of DC Motor

Shinya Kodama, Lianbing Li and Yoichi Hori (University of Tokyo)

In this paper, a novel slip prevention controller with a load torque disturbance observer using the signal of back EMF is proposed. When slip occurs, the equivalent inertia of EV system will change, and the acceleration of the drive wheels will also change. By constructing an observer, the value of the back EMF is acquired, which includes the information of wheel speed. Then a load torque observer is designed using the signal of back EMF to limit the torque (current) command, and keep the status of EV within a safe area. By selecting observer gain properly, the torque reduction can be adjusted freely in some range. The experimental results of the slip phenomenon simulator utilizing Motor-Generator set verified the effectiveness of the proposed approach.

キーワード: 電気自動車, スリップ抑制, 増粘着制御, 直流モータ

Keywords: EV(Electric Vehicle), Skid Prevention, Adhesion Control, DC Motor

1 はじめに

近年, 環境問題やエネルギー問題を解決するために様々な電気自動車が開発されてきた。なかには実用に耐えうる十分な性能の電気自動車も存在する。しかしながら, 「電気モータはトルク応答が高速で正確である」という電気自動車の最も注目すべき利点はこれまであまり用いられていなかった。モータのトラクションコントロールは, タイヤと路面間の増粘着特性に多大な影響を与える。すなわち, モータのトルク制御によって車両の安定性と安全性を向上させることが可能である。あらゆる路面状況下において, より良い増粘着性能を得るためには, スリップ抑制制御が不可欠である。加速時, 減速時, 制動時に生じるスリップは車両の運転に危険をもたらす。スリップ抑制のために, これまで多くの技術が開発されてきた。例えば, MFC (Model Following Control) ⁽¹⁾⁽²⁾, スライディングモード測定フィードバック制御 ⁽³⁾, スリップ率ファジィ制御 ⁽⁴⁾ などがそうである。最近では, 直流分巻モータのトルク垂下特性をまねることによるスリップ抑制制御 ⁽⁵⁾ を我々が提案してきた。本稿では, 逆起電力を用いた新しいスリップ抑制制御アルゴリズムを提案する。

2 車両のダイナミックモデル

車輪のスリップは, 図 1 に示した車両の一輪モデルを用いて解析することができる。このモデルには, 回転する車輪と車体の 2 つの慣性がある。車両の運動方程式は,

$$\dot{\omega} = \frac{T - F_d r - F_w(\omega) r}{J_w} \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{V} = \frac{F_d - F_V(V)}{M} \dots\dots\dots (2)$$

のように表現できる。ここで, T は駆動及び制動トルクの和を表わしている。つまり, $T = T_d - T_b$ となる。 F_d は駆動力, F_w は加速時の駆動輪の平均摩擦力及び減速時の全車輪の平均摩擦力, F_V は空気抵抗をそれぞれ示している。 M は車体と車輪の重量の和である。つまり, $M = M_v + M_w$ となる。

タイヤと路面間の増粘着特性は, スリップ率の概念を用いて表される。 V, V_W より, スリップ率 λ は, 式 (3) - (4) で定義される。

$$\lambda = \frac{V_W - V}{V_W} \quad (\text{Driving}) \dots\dots\dots (3)$$

$$\lambda = -\frac{V - V_W}{V} \quad (\text{Braking}) \dots\dots\dots (4)$$

ここで, V_W は車輪の速度, V は車両の速度である。

タイヤ-路面間の摩擦係数 μ は, スリップ率 λ の関数 $\mu = f(\lambda)$ で表わすことができ, μ は路面状況に依存する。すなわち, 乾燥路面, 濡れた路面, 雪道などの路面状況によって μ と λ の関係は変化する。

車両の駆動力 F_d は, 摩擦係数及び垂直抗力に比例する。 $\mu - \lambda$ 曲線を用いて, スリップ率 λ から摩擦係数 μ を得れば, 駆動力 F_d は,

$$F_d = N\mu(\lambda) \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで, N はタイヤに働く垂直抗力である。以上より, 車両のブロック線図は図 2 となる。

3 逆起電力によるスリップ抑制の仕組み

3.1 逆起電力オブザーバ

速度センサのない条件下では, スリップ抑制制御器は例えば

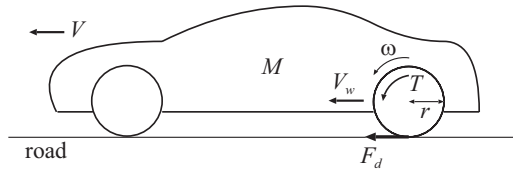


図 1 車両の一輪モデル
Fig. 1. One-wheel vehicle model.

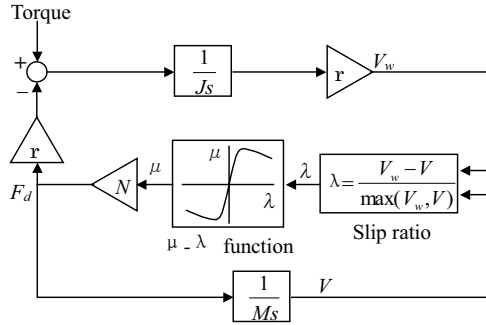


図 2 車両の一輪モデルのブロック線図
Fig. 2. Block diagram of the vehicle.

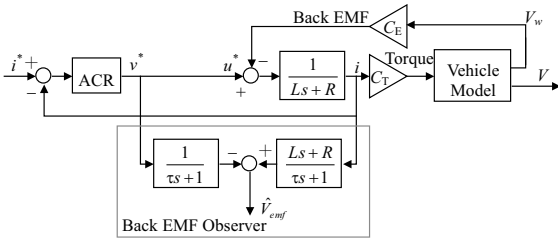


図 3 逆起電力オブザーバ
Fig. 3. Back-EMF observer.

逆起電力のような信号を用いて実現することができる。この種のスリップ抑制制御器は、信頼性が高く、ロバスト性も高い。しかし、逆起電力は直接検出することができないので、逆起電力の値を推定するオブザーバを組む必要がある。様々なゲインと時定数を用いた電流の外乱オブザーバについては、我々が過去に提案し議論してきた⁽⁵⁾。この方法では、スリップが発生した時に直流分巻モータが本来持つトルク垂下特性をうまく活かすことによりスリップの抑制を試みている。本稿では、図 3 に示すような逆起電力オブザーバを推定に用いる。

推定逆起電力は、式 (6) のように表現できる。

$$\hat{V}_{emf} = \frac{u^* - (Ls + R)i}{\tau s + 1} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\frac{1}{\tau s + 1}$ は推定値のノイズを抑制するローパスフィルタである。

また、制御器の内側のループでは、電流指令に瞬時に追従するために ACR (Appropriate Current Regulator) を設計している。

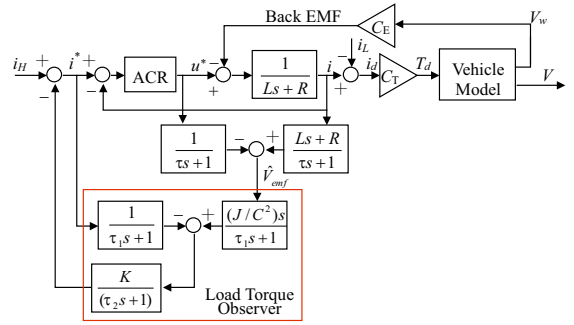


図 4 負荷トルクオブザーバ
Fig. 4. Load torque observer.

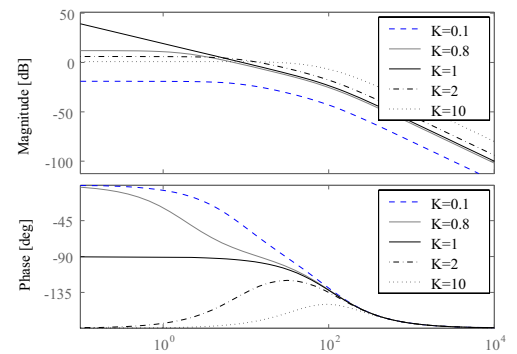


図 5 開ループ伝達関数のボデ線図
Fig. 5. Bode diagram of open loop transfer function.

3.2 逆起電力を用いたトルクオブザーバによるスリップ抑制の仕組み

逆起電力はモータの回転速度に比例するので、式 (6) は、式 (7) のようになる。

$$\hat{V}_{emf} = \omega C_e \frac{1}{\tau s + 1} \dots\dots\dots (7)$$

すなわち、図 4 に示すように逆起電力オブザーバの出力を用いた負荷トルクオブザーバを設計することができる。この手法を用いれば、負荷トルクの外乱は速度センサを用いずに観測することができる。図 4 において、電流とトルクは比例関係にあるので、負荷トルクは電流 i_L を用いて表わすことができる。また、 i_d は駆動電流である。

内側のループの時定数は、外側のループの $\frac{1}{10}$ であるから、システムの力学的解析を容易にするため、 i^* から i までの伝達関数を 1 とみなす。人間の駆動指令 i_H から駆動電流 i_d までの開ループ伝達関数は、式 (8) のようになる。

$$G_{OL} = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) - K} \dots\dots\dots (8)$$

図 5 に示すように、開ループ伝達関数のボデ線図を描くと、システムのダイナミクスは次のように解析できる。

ボデ線図から、 $K \leq 1$ のときはゲイン余裕と位相余裕は十分大きい、 $K > 1$ のときは余裕が少ないので、システム

の低周波域及び高周波域においてはロバスト性に欠ける。

i_H から i_d までの閉ループ伝達関数は、式 (9) のようになる。

$$G_{CL} = \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) + K(J_n/J - 1)} \dots\dots (9)$$

式 (9) において $J = J_n$ のとき閉ループ伝達関数は 1 となり、電流指令がそのまま実現されることが分かる。スリップが発生して、慣性モーメント J が減少した場合、伝達関数も J の変化に伴って減少する。一方、 J が増加した場合、加速度を一定に保つために伝達関数も増加する。

4 シミュレーション及び実験結果

車両が走行中に、乾いた路面から濡れた路面へと路面状態が変化した場合、タイヤと路面の間の摩擦は急激に減少する。仮に電気自動車のモータがそれまでと同じ駆動トルクを出し続けたなら、車輪が大空転を起こすことが考えられる。図 2 及び 4 に示した電気自動車のシステムを用いて、MATLAB でスリップ現象のシミュレーションを行う。乾いた路面上で車両は $t = 0[s]$ で加速を開始し、 $t = 3[s]$ で濡れた路面に入るものとする。電気自動車のシステムのパラメータには、我々の研究室の実験用電気自動車「東大三月号 I」のものを用いる。なお、実験結果との比較のため、シミュレーション結果のグラフの範囲は実験結果に合わせている。

4.1 シミュレーション結果

スリップ制御器の性能と負荷トルクオブザーバのゲインとの関係を調べるために、ゲイン K を 0 から 10 まで変化させた。シミュレーション結果を図 6 に示す。図 6(a) 及び (c) では、 $K = 0$ の時、スリップ発生後に車輪速度は急激に増加している。しかし、 $K = 1$ の時、加速度が一定に保たれるため、車輪速度の急激な上昇は抑制されている。 $K > 1$ の時、スリップ発生後に車輪速度が減少している。図 6(b) 及び (d) においても、トルク及びオブザーバの出力に同じことが言える。以上より、図 6(e) に示すように、 K が増加するに伴ってスリップ率が抑制されることが分かる。

4.2 実験結果

本研究では、電気自動車におけるスリップ現象をシミュレーションするために、図 7 に示す実験装置 MG セット (DC Motor-Generator Setup) を用いている。システム全体のブロック線図を図 8 に示した。MG セットにおいて、駆動側モータ及び負荷側モータはそれぞれ独立に制御することが可能である。また、実際の電気自動車と同様に慣性の変化をシミュレーションする慣性シミュレータも設計した。

実験結果を図 9 に示した。多少のノイズを除けば、実験結果の曲線は、図 6 に示したシミュレーション結果と同じ特徴を

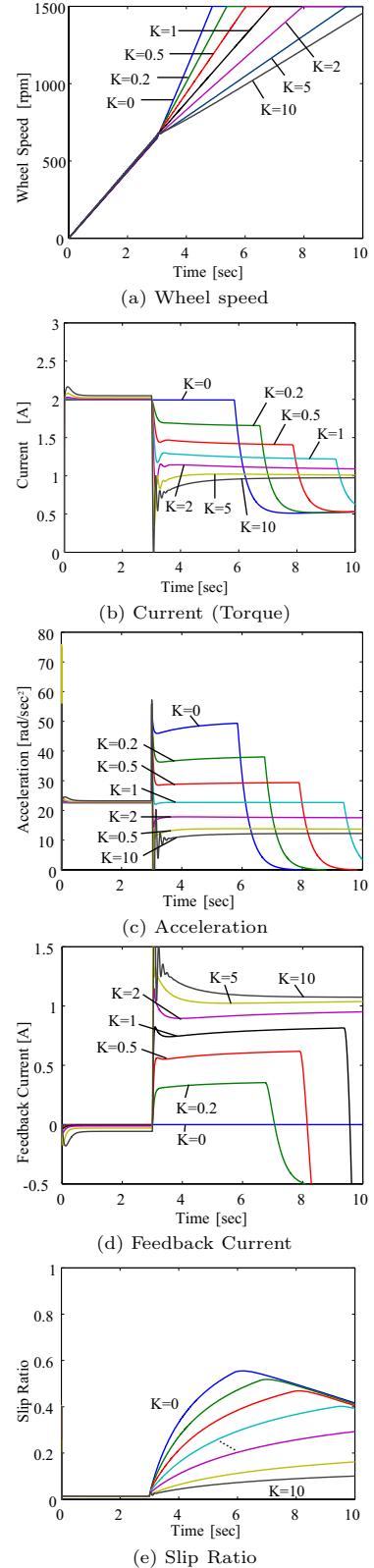


図 6 MG セットを用いたスリップ抑制制御のシミュレーション結果
Fig.6. Simulation results of EV system.

持っていることが分かる。すなわち、 K の上昇に伴って、加速度、スリップ率ともに効果的に抑制されている。

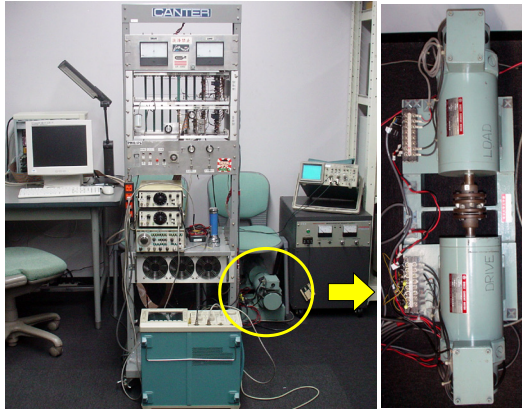


図 7 実験装置 MG セット
Fig. 7. Experimental system.

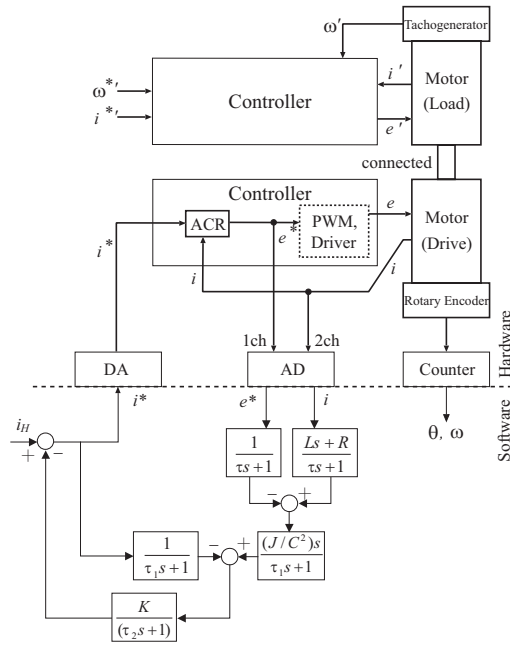
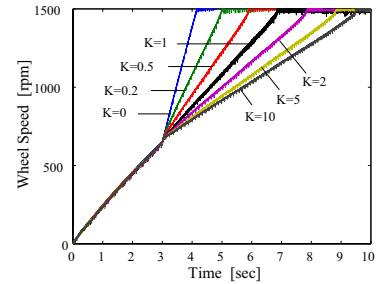
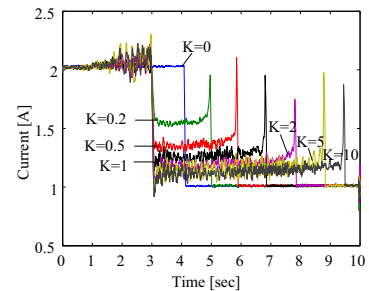


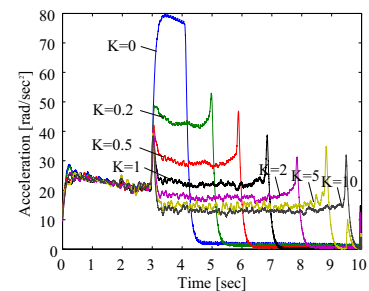
図 8 実験装置のブロック図
Fig. 8. Block diagram of experimental system.



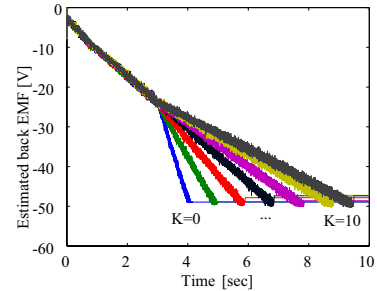
(a) Wheel speed



(b) Current (Torque)



(c) Acceleration



(d) Estimated Back-EMF

図 9 MG セットを用いたスリップ抑制制御の実験結果
Fig. 9. Experimental results.

5 む す び

逆起電力を用いることで、今回提案した新しいスリップ抑制制御手法は車輪エンコーダを必要としないため、スリップ抑制制御の信頼性を向上させることができた。実験において、スリップ制御器の応答時間を 0.1[s] 以内とすることができた。シミュレーション及び実験結果から、逆起電力制御器のトルクの垂下によって、電気自動車の加速時におけるスリップ現象を効果的に抑制可能なことが確認できた。

文 献

- (1) Y. Hori, "Traction Control of Electric Vehicle: Basic Experimental Results Using the Test EV UOT Electric March," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 34, No. 5,

pp.1131–1138, 1998.

- (2) S. Sakai and Y. Hori, "Advantage of Electric Motor for Anti Skid Control of Electric Vehicle," *EPE Journal*, Vol.11, No.4, pp.26–32, 2001.
- (3) C. Unsal and P. Kachroo, "Sliding Mode Measurement Feedback Control for Antilock Braking System," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 7, No. 2, pp.271–281, 1999.
- (4) F. Yu, J. Z. Feng and J. Li, "A Fuzzy Logic Controller Design for Vehicle ABS with an On-Line Optimized Target Wheel Slip Ratio," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 165-170, 2002.
- (5) S. Kodama, L. Li and Y. Hori, "Skid Prevention for EVs based on the Emulation of Torque Characteristics of Separately-wound DC Motor," in *Proc. IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Kawasaki, Japan, 2004, pp.75-80.