

直流分巻モータのトルク垂下特性をまねることによる電気自動車のスリップ抑制制御 —ブラシレス DC モータ搭載の新車両「東大カドウェル号」の製作と実験—

小玉 晋也*, 堀 洋一 (東京大学)

Skid Prevention for EVs based on the Emulation of Torque Characteristics of Separately-wound DC Motor —Practical Experiments of Our New Vehicle “UOT CADWELL EV” Equipped with BLDC Motors—

Shinya Kodama and Yoichi Hori (University of Tokyo)

Abstract

It is well-known that the separately-wound DC motor has effective torque (current) reduction characteristics in response to rapid increase in the rotational speed of the motor. This characteristics has been utilized in adhesion control of electric locomotives with DC motor. Up to now, we have proposed a new skid prevention method for EVs, utilizing this characteristics and have made experiments with the hardware skid simulator “Motor-Generator setup”. In this paper, an implement method for applying this skid prevention control to our new vehicle “UOT CADWELL EV” equipped with BLDC motors is proposed and demonstrated. The experimental results of “UOT CADWELL EV” verified the effectiveness of our proposed method.

キーワード: 電気自動車, スリップ抑制, 増粘着制御, 直流分巻モータ, トルク垂下特性, ブラシレス DC モータ
(Keywords: EV(Electric Vehicle), Skid Prevention, Adhesion Control, Separately-wound DC Motor, Torque Characteristics, BLDC Motor)

1 はじめに

近年, 電気自動車やハイブリッド車に代表される電気モータを搭載した自動車が環境問題やエネルギー問題の有効な解決策の一つとして注目され, とりわけハイブリッド車は, 低燃費を誇る市販車も登場し始めている.

電気自動車(本稿では, 電気モータを搭載した自動車の総称として用いる.)の利点は, 上述のように低燃費などがよく取り上げられるが, 内燃機関車に比べてトルク応答が速く正確であるという電気モータの優れた特徴を活かした, 電気自動車ならではの高性能なトラクションコントロールの実現に向けての研究はあまり行われていないというのが現状である⁽¹⁾⁽²⁾.

本稿では, 電気自動車の高速な応答性を活かす好例として, 直流分巻モータのトルク(電流)垂下特性を用いた新しいスリップ抑制制御について検討する. 前半では, トルク(電流)垂下特性によるスリップ抑制の仕組みを述べると共に, 直流分巻モータを用いた電気自動車と路面状態のハードウェアシミュレータである MG セットを用いてこれまで行ってきた研究経緯⁽³⁾⁽⁴⁾について述べる. 後半では, 直流分巻モータのトルク(電流)垂下特性によるスリップ抑制制御を, 現在電気自動車に好んで用いられている永久磁石交流同期機であるブラシレス DC モータ(BLDCM)を搭載した電気自動車において実現すべく, 新車両「東大カドウェル号」を製作し, その制御手法について述べる.

2 直流分巻モータを搭載した電気自動車のスリップ抑制制御

2.1 車両の 1 次元運動

まずはじめに, 車両の運動の最も基本となる前後方向のみを考える 1 次元運動を検討する.

モータの時定数は十分短く, 転がり抵抗と空気抵抗は十分小さいと仮定し車両に働く力を考えると, 車両の運動方程式は式(1)–(3)で表すことができる.

$$\omega = \frac{1}{J_s}(T - rF_d) \dots\dots\dots (1)$$

$$V = \frac{1}{M_s}F_d \dots\dots\dots (2)$$

$$V_W = r\omega \dots\dots\dots (3)$$

式中の各変数は, 減速後のモータの回転速度 $\omega (= \omega_{rm}/\text{Gear Ratio})$, 車体速度 V , 車輪速度 V_W , 駆動力 F_d , モータの駆動トルク T であり, 各定数は, モータなどの総慣性モーメント J , タイヤ半径 r , 車体重量 M である. また, 記号は, ラプラス演算子 s である. 式(1)は, 駆動輪の運動方程式であり, 車輪にはモータのトルクと路面から受ける駆動力の反力が働くことを示す. 式(2)は, 車体の運動方程式である.

さらに, スリップ率の概念を用いて車両の一輪モデルを考えると, 図1のように表現することができる.

また, 直流分巻モータを搭載した電気自動車のブロック線図を図2に示す. 次に, 従来の FB (FeedBack) 電流制御手法と今回提案する FF (FeedForward) 電流制御手法について述べる.

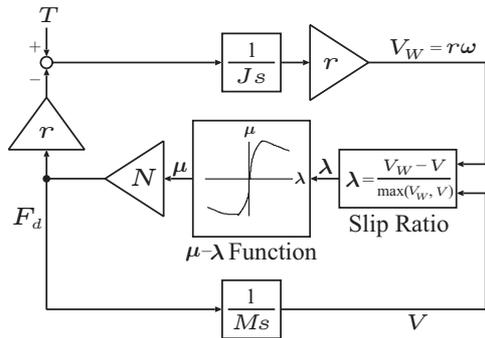


図 1 車両の一輪モデル

Fig. 1. The block diagram of the one-wheel vehicle model.

2.2 FB 電流制御 (従来手法)

直流分巻モータを搭載した電気自動車に、従来手法である *FB* 電流制御を適用すると、例えば図 2(a) のように表される。同図では、電流制御器として *PI* 制御器を用いている。

従来手法を用いた場合、常に電流値を指令通りに一定に保とうとするため、スリップ発生時にモータの回転速度が急激に上昇してしまい、いわゆるタイヤの大空転は避けられない。

2.3 FF 電流制御 (提案手法)

図 2(b) は、直流分巻モータを搭載した電気自動車のブロック線図に今回提案する *FF* 電流制御フィルタ $G^{-1}(s)$ を加えた様子を示している。このフィルタ $G^{-1}(s)$ は同図 2(b) における電圧指令 v^* から実際のモータ電流 i までの伝達関数を求め、定常走行中は一定値である J を J_n とした時の逆関数を表している。このフィルタ $G^{-1}(s)$ を用いることで、実際のモータ電流は指令値を実現することができる。

自動車が行っている最中に、例えば乾燥したアスファルトから雪道に入るなどして路面が急に滑りやすい状態になった場合には、急激にタイヤ-路面間の摩擦が減少するので、仮に電気モータがそれまでと同じトルクを出したならば、タイヤは大空転を起こすことが考えられる。

しかし、直流分巻モータのトルク (電流) 垂下特性をうまく活かすことができれば、このようなスリップ現象 (タイヤの大空転) を抑制することができる。モータの回転速度が一旦は急激に上昇するが、モータの回転速度に比例する逆起電力がトルクを低減させるため、車輪の急激な加速を抑制するためである。これが、直流分巻モータにおけるトルク (電流) 垂下特性を活かしたスリップ抑制の仕組みである。

本手法の利点は、従来手法である *FB* 電流制御系ループのさらに外側に速度制御系ループを組むなどといった複雑な制御演算を一切必要とせず、電気モータが本来持つ特性をうまく活かしているため、スリップ発生時に高速にトルク (電流) を低減できるという点である。

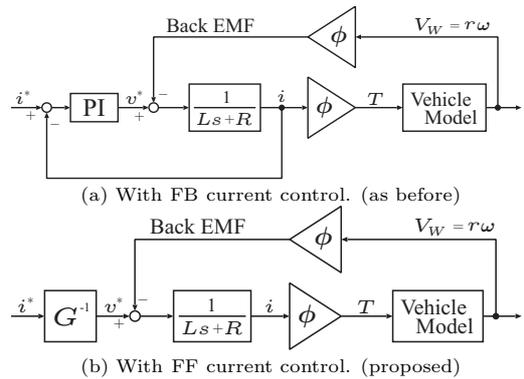


図 2 直流分巻モータを搭載した電気自動車のブロック図

Fig. 2. The block diagram of the EV system equipped with separately wound DC motor.

表 1 ブラシレス DC モータを表現するための諸変数及び諸定数

Table 1. Parameters and constants.

諸変数		諸定数, 記号	
v_d	電機子電圧の d 軸成分	R_a	電機子巻線抵抗
v_q	電機子電圧の q 軸成分	L_d	d 軸インダクタンス
i_d	電機子電流の d 軸成分	L_q	q 軸インダクタンス
i_q	電機子電流の q 軸成分	ϕ_a	永久磁石による鎖交磁束
ω_{re}	電気角速度	P_n	極対数
ω_{rm}	機械角速度	J	総慣性モーメント
θ_{re}	電気角	p	微分演算子 (= d/dt)
T	トルク		

3 ブラシレス DC モータを搭載した電気自動車のスリップ抑制制御

本章では、直流分巻モータを搭載した電気自動車において実現することができたトルク (電流) 垂下特性によるスリップ抑制制御手法の永久磁石交流同期機であるブラシレス *DC* モータを搭載した実際の電気自動車への適用を検討する。

3.1 ブラシレス DC モータのベクトル制御概要

ブラシレス *DC* モータを用いるにあたって必要な諸変数及び諸定数を表 1 に示した。また、ベクトル制御 *dq* 軸の考え方をを用いて表したブラシレス *DC* モータの等価回路方程式は、

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_a + pL_d & -\omega_{re}L_q \\ \omega_{re}L_d & R_a + pL_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_{re}\phi_a \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

となる⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。

今回提案する *FF* 電流制御によるスリップ抑制を実現するために、従来のブラシレス *DC* モータのベクトル制御の構成中に 2 つのフィルタ (*Filter1*, *Filter2*) を追加し、従来手法と今回

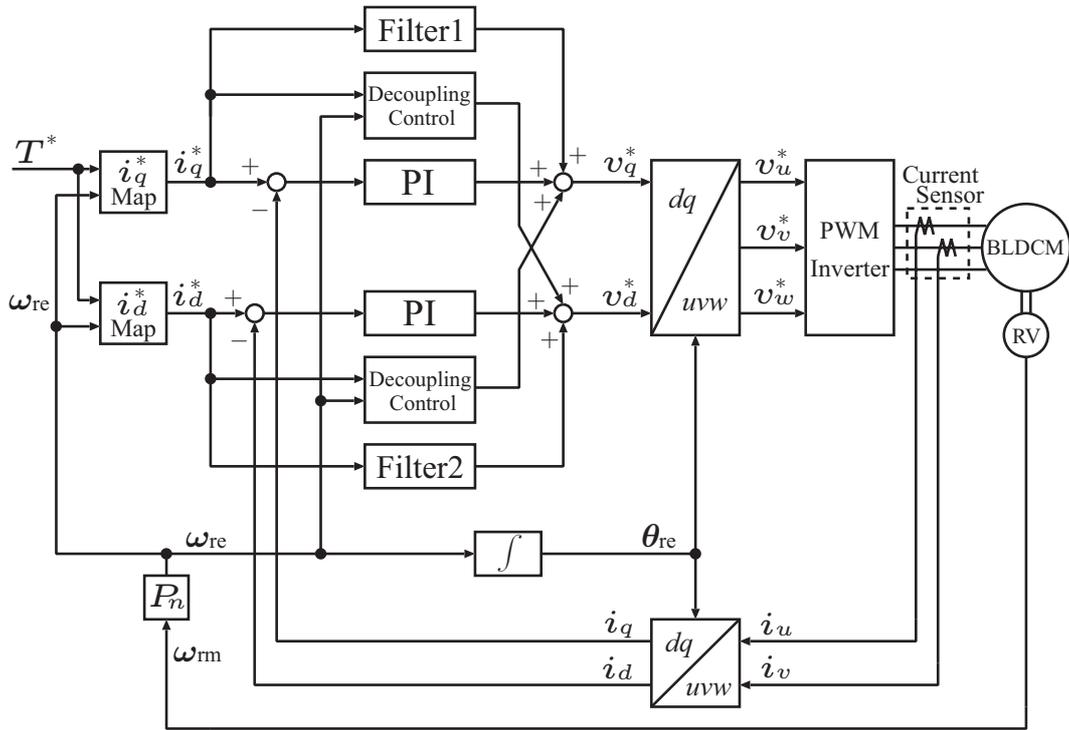


図3 ブラシレス DC モータのベクトル制御全体構成

Fig. 3. The vector control configuration of the EV system equipped with BLDC motor.

提案する手法を両方含んだ構成として、図3にブラシレス DC モータのベクトル制御全体構成を示す。

3.2 FB 電流制御（従来手法）

従来の FB 電流制御（弱め界磁制御付きベクトル制御）は、図3のベクトル制御 dq 軸ごとにそれぞれ PI 制御器で行う。

3.3 FF+FB 電流制御（提案手法）

非干渉制御されたブラシレス DC モータを搭載した電気自動車のブロック図は図4で表すことができる。図中において、 v_q^* から i_q までの伝達関数 $G_q(s)$ 、 v_d^* から i_d までの伝達関数 $G_d(s)$ はそれぞれ

$$\begin{aligned}
 G_q(s) &= \frac{i_q}{v_q^*} \\
 &= \frac{1}{L_q s + R_a + \frac{P_n^2 \phi_a^2}{J s}} \\
 &\approx \frac{J}{P_n^2 \phi_a^2 (1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s)} \\
 &\approx \frac{J}{P_n^2 \phi_a^2} \frac{s}{1 + \tau_m s} \dots \dots \dots (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G_d(s) &= \frac{i_d}{v_d^*} \\
 &= \frac{1}{L_d s + R_a} \dots \dots \dots (6)
 \end{aligned}$$

と表現できる。ここで、機械系時定数 τ_m 、電気系時定数 τ_e は

それぞれ

$$\tau_m = \frac{J R_a}{P_n^2 \phi_a^2} \dots \dots \dots (7)$$

$$\tau_e = \frac{L_q}{R_a} \dots \dots \dots (8)$$

となる。また、ベクトル制御においてトルク成分に関与するのは q 軸だけであるから、 $G_q(s)$ の逆関数 $G_q^{-1}(s)$ を求めると、

$$\begin{aligned}
 G_q^{-1}(s) &= \frac{P_n^2 \phi_a^2}{J} \frac{1 + \tau_m s}{s} \\
 &= \frac{P_n^2 \phi_a^2}{J} \frac{1}{s} + R_a \dots \dots \dots (9)
 \end{aligned}$$

となる。よって、フィルタは、

$$\begin{aligned}
 F &= \begin{pmatrix} Filter1 \\ Filter2 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} G_q^{-1}(s) \\ 0 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (10)
 \end{aligned}$$

となる。本提案手法では、トルク成分に関与する q 軸には FF フィルタを用いてマイクロな時間スケールではスリップ発生時にトルク（電流）垂下特性を用いてスリップを抑制し、マクロな時間スケールでは定められたトルクを出力するために FB 電流制御を用いる。すなわち、FF フィルタと電流制御比例ゲインを FB 電流制御としての最適値より下げた FB 手法とのハイブリッド電流制御となる。なお、トルク成分に関与しない d 軸には従来通りの FB 電流制御のみを用いる。

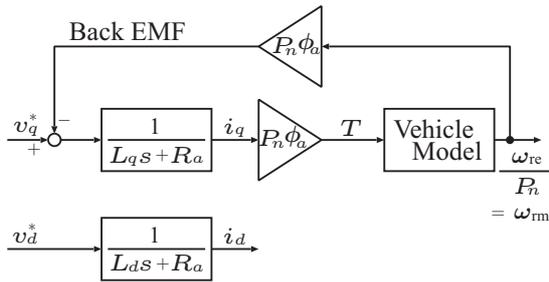


図 4 非干渉化制御されたブラシレス DC モータを搭載した電気自動車のブロック線図

Fig. 4. The block diagram of the EV system equipped with decoupling controlled BLDC Motor.

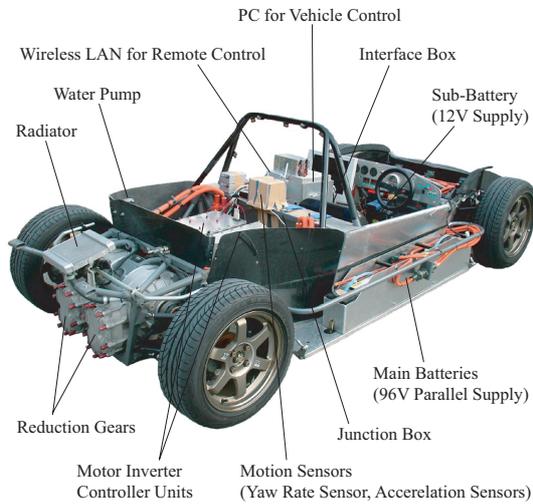


図 5 「東大カドウェル号」の構成

Fig. 5. The configuration of "UOT CADWELL EV".

4 「東大カドウェル号」の製作と実験

4.1 実験用電気自動車「東大カドウェル号」

図 5 に示す東大カドウェル号は、2つのブラシレス DC モータを搭載し、左右後輪を独立駆動することが可能である。各種センサからの情報は車両制御 PC によって集中管理されるが、提案手法のフィルタを含むブラシレス DC モータのベクトル制御系は、モータインバータコントローラ (MIC: Motor Inverter Controller) 一体型ユニット中のマイコンによって実現する。同図中のインターフェイスボックスは、各種センサ情報及び MIC との通信などの電気特性を車両制御 PC に合わせて変換するものであり、ジャンクションボックスは、強電系 (96V 系) のコンタクタ及び電力変換回路などを含んでいる。

4.2 乾燥路面での走行試験

まずはじめに、乾燥したアスファルト路面において、従来手法及び提案手法により車両を駆動し、一定のトルク指令で加速し

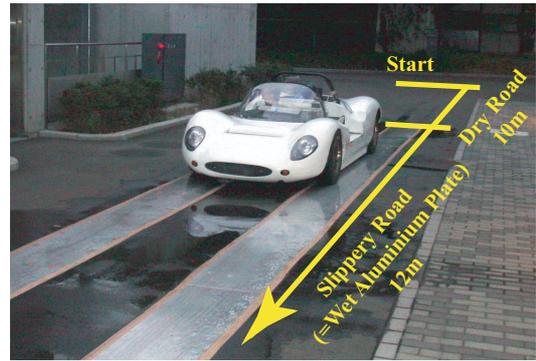


図 6 1次元増粘着制御実験の様子

Fig. 6. Experimentation at IIS.

た時の実験結果をそれぞれ図 7 及び 8 に示す。これらより、スリップの発生しないような状況下においては、提案手法において電流制御の比例ゲインを下げていた分、電流の波形が若干荒いが、両手法において大きな違いは見られず同じ加速性能を得ていることが確認できる。

4.3 1次元増粘着制御

次に、前後方向のみを考えた 1次元運動において、従来手法及び提案手法において一定トルク指令で加速中に乾燥した路面から滑りやすい路面へ進入した時の実験結果をそれぞれ図 9 及び 10 に示す。これらより、従来手法においてはスリップの発生時にモータの回転速度が急上昇してしまっているが、提案手法においては、若干の回転速度の上昇はあるもののトルク (電流) 垂下特性により回転速度の急上昇がうまく抑制されていることが確認できる。この実験の様子を、図 6 に示す。

4.4 2次元増粘着制御

次に、滑りやすい路面上で一定の半径を保つような旋回運動を考えた 2次元運動において、従来手法及び提案手法を用いてプロテストドライバーの自由なアクセルワークによるトルク指令で加速した時の実験結果をそれぞれ図 11 及び 12 に示す。これらより、従来手法においては、少しアクセルを踏んだだけで、タイヤの大空転が起り、モータの回転速度が急上昇してしまい、アクセルを踏み続けることができないことが確認できる。これに対して、提案手法においては、スリップの発生時にトルク (電流) 垂下特性により、うまく回転速度の急上昇を抑制することで、アクセルを踏み続けることが可能になり、良好な加速性能を得られていることが確認できる。

以上より、提案手法が電気自動車におけるスリップを完全に抑制できるものではないが、モータが本来持つ特性を活かしているため、非常に高速な応答特性をもったスリップ抑制を実現できていることが分かる。また、提案手法を他のモータ制御手法と組み合わせることによって、電気自動車のスリップ抑制にさらなる効果を発揮する可能性があることも付け加えたい。

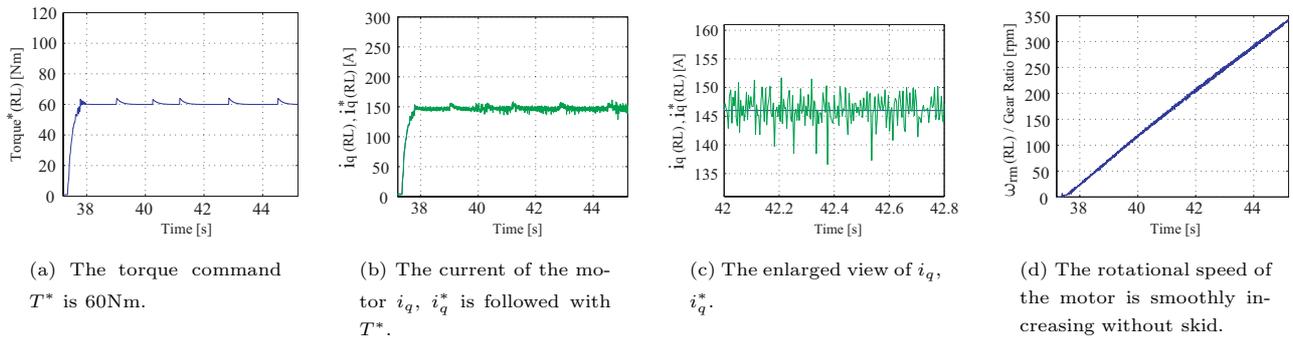


図 7 従来手法 (FB) を用いた乾燥路面での走行試験結果
Fig. 7. The experimental results of the driving on dry road with FB current control.

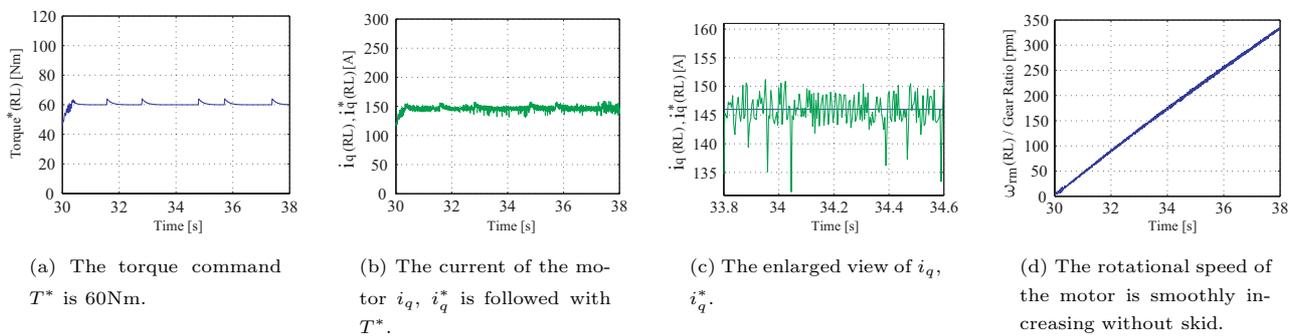


図 8 提案手法 (FF+FB) を用いた乾燥路面での走行試験結果
Fig. 8. The experimental results of the driving on dry road with FF+FB current control.

5 むすび

増粘着制御の原理は、車輪が小さなスリップを起こした時、ミクロな時間スケールでは大きなトルク（電流）垂下特性を示すが、マクロな時間スケールでは定められたトルクを出力する特性を示すものになればよい。この特性は電圧源で駆動される直流分巻モータの特性そのものであり、鉄道では主として私鉄車両を中心に広く用いられてきた。現在電気自動車に好んで用いられるのは永久磁石交流同期機（ブラシレス DC モータ）であり、はじめから高性能な FB 電流制御が施される。しかしながら、この FB 電流制御は粘着性能の点では最悪であることは意外に知られておらず、既存の諸手法も FB 電流制御を前提としている。

本稿では、トルク（電流）垂下特性に着目した電気自動車におけるスリップ抑制制御手法を提案し、その実現のために、ブラシレス DC モータを搭載した実験用電気自動車「東大カドウェル号」を製作し、実験を重ねることで提案手法の有効性を確認した。

本研究の成果が広く用いられるようになれば、スリップなどの危険性が格段に少なくなることはもちろん、滑りやすい路面でも高度な姿勢制御によって自動車運転の安全性向上に大いに貢献できる。筆者らの研究がモータの制御によってより安全なクルマを開発することに代表される「動くもの」を開発するための一助となれば幸いである。

謝 辞

本研究を行うにあたって、モータ製作にご協力いただいた（株）日立製作所の皆様、車両の改造にご協力いただいた（株）東京アールアンドデーの皆様、そして内田技術官をはじめ多々ご協力いただいた研究室諸氏に感謝の意を表します。

文 献

- (1) Y. Hori, "Traction Control of Electric Vehicle: Basic Experimental Results Using the Test EV UOT Electric March," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, Vol. 34, No. 5, pp.1131-1138, 1998.
- (2) Y. Hori, "Future Vehicle Driven by Electricity and Control-Research on Four-Wheel-Motored "UOT Electric March II", " *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, Vol. 51, No. 5, pp.954-962, 2004.
- (3) 宮本, 堀, "外乱オブザーバを用いた電気自動車のスリップ抑制制御," 電気学会産業計測制御研究会 (IIC-00-9), pp.49-54, 2000.
- (4) 小玉, 李, 堀, "直流分巻モータのトルク垂下特性をまねることによる電気自動車のスリップ抑制制御," 電気学会自動車研究会 (VT-04-12), pp.63-68, 2004.
- (5) 杉本, 小山, 玉井, "AC サーボシステムの理論と設計の実際 基礎からソフトウェアサーボまで," 総合電子出版社, 1990.
- (6) S. Morimoto, et al., "Design and Control System of Inverter-Driven Permanent Magnet Synchronous Motors for High Torque Operation," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, Vol. 29, No. 6, pp.1150-1155, 1993.
- (7) 堀, 寺谷, 正木, "モータ実用ポケットブック 自動車用モータ技術," 日刊工業新聞社, 2003.

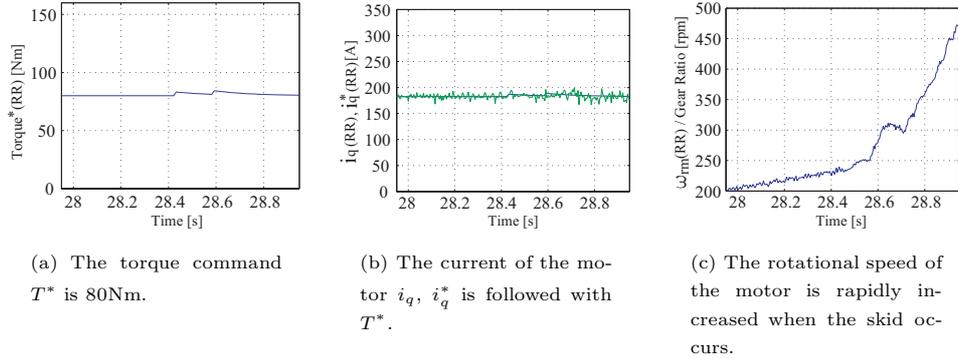


図 9 従来手法 (FB) を用いた 1 次元増粘着制御実験結果
Fig. 9. The experimental results of the skid phenomenon with FB current control.

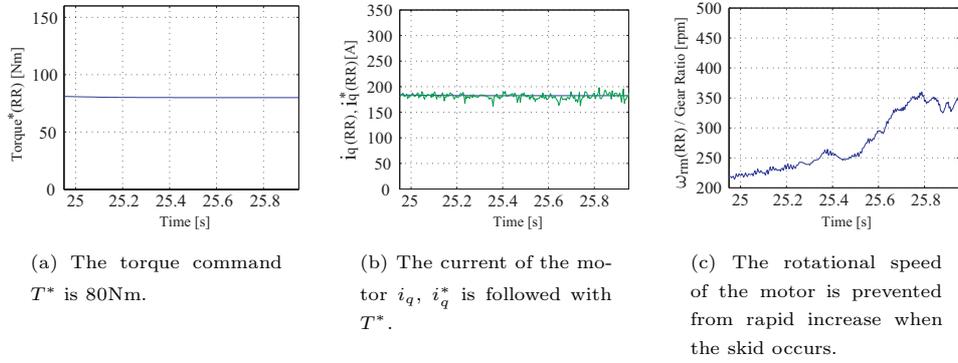


図 10 提案手法 (FF+FB) を用いた 1 次元増粘着制御実験結果
Fig. 10. The experimental results of the skid phenomenon with FF+FB current control.

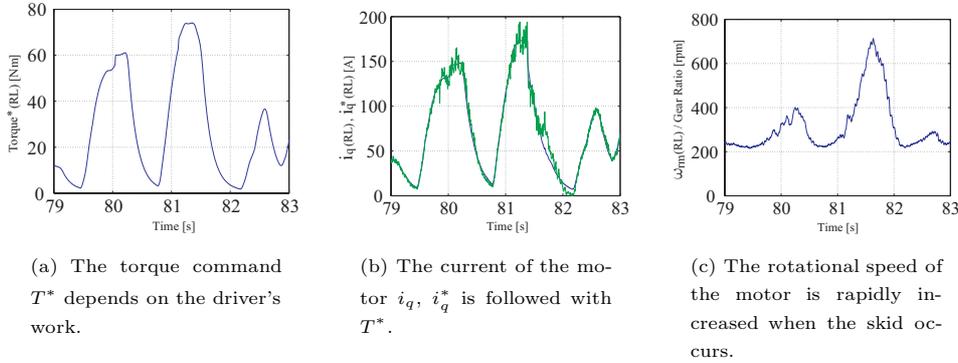


図 11 従来手法 (FB) を用いた 2 次元増粘着制御実験結果
Fig. 11. The experimental results of the 2 dimensional skid phenomenon with FB current control.

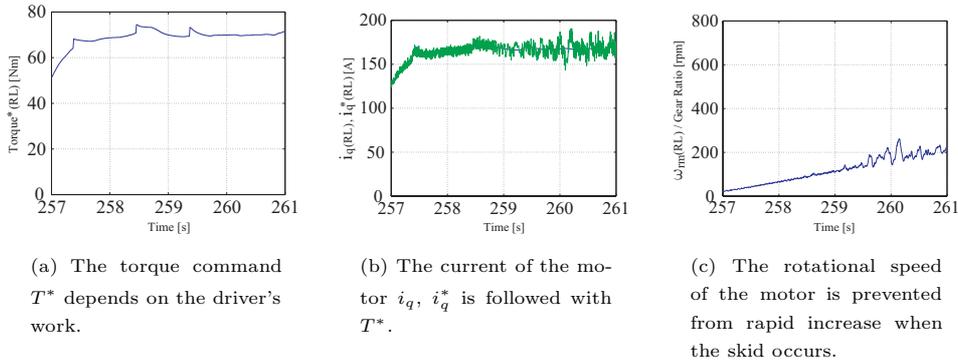


図 12 提案手法 (FF+FB) を用いた 2 次元増粘着制御実験結果
Fig. 12. The experimental results of the 2 dimensional skid phenomenon with FF+FB current control.