

# 電気モータの高速応答を利用した 電気自動車のブレーキ性能の向上

小池 卓志, 堀 洋一 (東京大学)

Advanced Braking System based on High Speed Response of Electric Motor

Takashi Koike, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

The generated torque of electric motors can be controlled much more quickly and precisely than that of hydraulic actuator. Therefore, by utilizing electric motors for braking system, we can realize quicker and more precise braking system. However, the capacity of electric motor used in HEV's (hybrid electric vehicle) power train is not enough, and thus unable to produce sufficient braking torque only with electric motor. Hence we have to use hydraulic actuator for braking system together, but its response is slower. In this paper, we propose a novel braking system using electric motor which compensates for hydraulic actuator. The experimental results are shown to verify the effectiveness of the proposed method.

キーワード：電気自動車, ブレーキシステム, 外乱オブザーバ  
Keywords: electric vehicle, braking system, disturbance observer

## 1. はじめに

現在、内燃機関自動車を使うことによって生じる環境問題や燃料問題を解決するため多くの電気自動車が開発されてきている。中でも石油価格の上昇により、エネルギー効率が優れているハイブリッド自動車 (HEV) が注目を浴びており、今後も自動車の新方式として普及していくことは間違いないであろう。<sup>(1)</sup>

しかしながら、これらの方式において電気モータはエネルギー効率についてのみ議論されることが多く運動制御における電気モータの特徴を活かしきれていない。電気モータの運動制御における特徴とは以下のようなものあげられる。

- (1) トルク指令からトルク出力までの応答が高速で正確
- (2) 出力トルクの大きさが正確にわかる
- (3) モータの小型化が可能なので分散配置できる
- (4) 制動・駆動共に可能

1. モータのトルク応答速度は 1[msec] 程度なので、エンジンや油圧ブレーキより高速なため応答速度の速さを利用した高度な制御が可能になる。

2. 出力トルクの大きさが正確にわかると、タイヤと路面の間に生じる駆動力、制動力の推定がリアルタイムで可能になる。この事は、路面状態を考慮した、全く新しい制御が実現できる事を意味している。

3. モータの小型化、分散化により各タイヤのトルクを自由に制御できるので、内燃機関車より自動車の高度な二次元制御が容易にできる。

4. モータは電流を流す方向により前後両方に回転させることができるため、車両の運動としては駆動時・制動時の両方の場合に用いることができる。

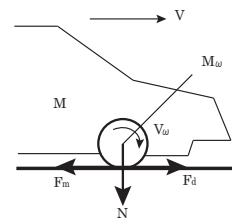


図 1 車両の一輪モデル

Fig. 1. One tire model of vehicle

本論文は、これらの電気モータの特徴を利用することでブレーキシステムの改善を図ることを目的としている。ただし電気モータだけでは十分な制動力を得られないので油圧アクチュエータもブレーキシステムには使わなくてはならない。そこで電気モータ・油圧アクチュエータの両方を使うことを前提とし、電気モータの高速で正確な応答を利用することで電気モータに応答性において劣る油圧アクチュエータを補償することにより、正確な制動を実現する方法を提案している。

## 2. 車体の一次元運動特性

本論文では、電気モータによる油圧アクチュエータの補償を考える際、シミュレーションによる検討を行う。そのため、まず車体の一次元における運動についての説明を行う。ここではタイヤ輪を取り出して考えた車体の一輪モデルを用いている。

そのモデルを Fig.1 に示した。M は車両重量、V は車体速度、V<sub>w</sub> は車輪速度、F<sub>d</sub> はタイヤから路面に伝わる力、

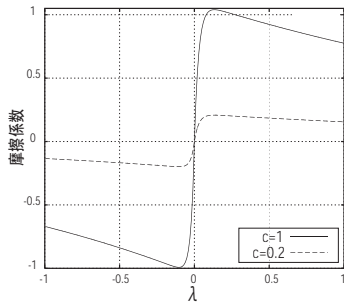


図2 μ-λ 曲線  
Fig. 2. μ-λ curve

$N$  は垂直抗力をあらわしている。

この一輪モデルにおける車両の運動方程式・タイヤの回転の運動方程式は、

$$M \frac{dV}{dt} = F_d(\lambda) - F_a \dots\dots\dots (1)$$

$$M_w \frac{dV_w}{dt} = F_m - F_d(\lambda) \dots\dots\dots (2)$$

のようにあらわせる。ただし、 $M_w$  はタイヤと付随する回転部を合わせた部分の慣性の質量換算値、 $F_a$  は車体に対する空気抵抗をあらわしているとする。

ここで  $F_d$  は  $\lambda$  の関数としているが、 $\lambda$  とはスリップ率のことで式 (3) と定義されている。

$$\lambda = \frac{V_w - V}{\max(V_w, V)} \dots\dots\dots (3)$$

スリップ率とは、ある車両の対地重心速度  $V$  とその車両の車輪回転速度  $V_w$  の比をあらわしていてタイヤの空転や粘着について考えるときによく用いられる。

次にスリップ率  $\lambda$  と摩擦係数  $\mu$  の関係をあらわす  $\mu$ - $\lambda$  曲線について考える。この関係の数式モデルとしては Magic Formula などいくつかのモデルが存在する。<sup>(2)</sup> ここでは式 (4)(5) とした。

$$\mu = -c \times 1.1(e^{-35\lambda} - e^{-0.35\lambda}) : V_w > V \dots\dots (4)$$

$$\mu = c \times 1.05(e^{45\lambda} - e^{0.45\lambda}) : V > V_w \dots\dots (5)$$

$c$  は路面の状況によって変化するもので、小さいほど滑りやすい路面となっている。その様子を Fig.2 に示した。s スリップ率と  $\mu$ - $\lambda$  曲線から摩擦係数  $\mu$  が得られ、式 (6) により駆動力  $F_d$  が求まる。

$$F_d = \mu(\lambda)N \dots\dots\dots (6)$$

### 3. 油圧アクチュエータの概要と欠点

現在、ブレーキとして多く使われているのは油圧アクチュエータである。これは油圧ブレーキは多少の応答遅れはあるものの、大きな力を各輪に平均して制動力を発揮するこ

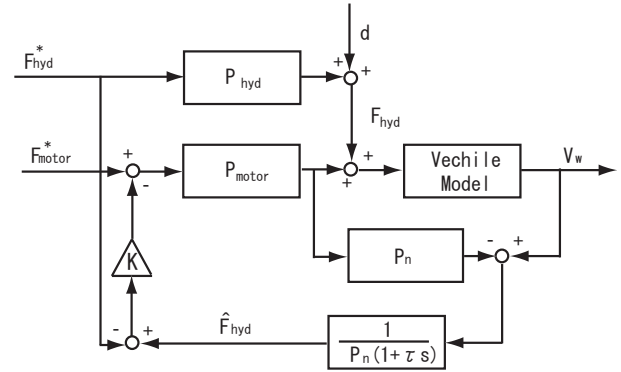


図3 車体のノミナルモデルを用いた油圧ブレーキの補償ブロック図

Fig. 3. Block diagram of braking system using vehicle nominal model

とができるからである。<sup>(3) (4)</sup>

しかしながら、油圧ブレーキはブレーキペダルを入力装置として油圧シリンダをコントロールするため大きな非線形性を有している。このことは、タイヤに入力される制動力が正確にはわからないことを意味している。そのため、人間がブレーキを使うことで車両の運動をコントロールしようすると車両それぞれのブレーキパッドの過熱・磨耗具合によりブレーキのかかり具合が変化することになる。

### 4. 油圧と電気ブレーキの協調制動の提案

第1章に述べたように電気モータは高速かつ正確なトルク応答をもっている。さらに、電気モータは駆動・制動共に使えるのでこれをブレーキとして利用することでエネルギー回生を行いながら高速かつ正確な制動力を出すことが可能となる。

しかし、電気モータ単独では制動用のアクチュエータとしては十分ではない。これは、制動用としては緊急時に大きな力を出す必要があるが電気モータでは油圧アクチュエータほどの大きな力をだすことができなかつたり、故障したりバッテリーが過電圧の場合は電気モータをブレーキとしては使うことができないためである。

そのため、ここでは油圧アクチュエータと電気ブレーキを両方使うことでより性能のよいブレーキシステムをつくることのできるのではないかと考え新しい方式を提案する。

4.1 外乱オブザーバを用いた電気ブレーキによる油圧ブレーキの補償 ここでは外乱オブザーバを用いることで電気ブレーキによる油圧ブレーキの補償を行う方法を提案する。

油圧ブレーキは、ブレーキパッドを通して制動力が出力されるためブレーキパッドの過熱、磨耗の具合により応答性、正確性に問題が生じることが考えられる。

そこで、油圧ブレーキの指令値からのずれを外乱とみなしてやることにより電気ブレーキによって補償してやることで、高速かつ正確な制動トルクをだすことができる。

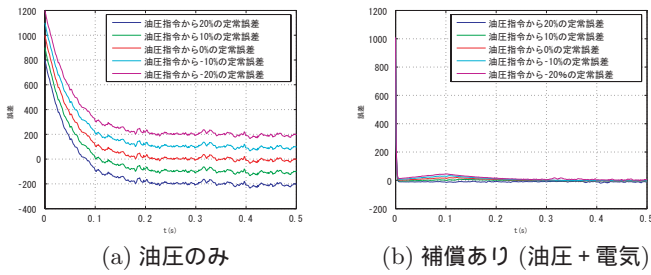


図 4 定常誤差に対する指令値からの誤差

Fig. 4. Simulation results of proposed method about steady-state error

Fig.3 にそのブロック図を示した。車体のノミナルモデル  $P_n(s)$  はここでは粘着しているものとして考え、式 (7) としている。

$$P_n(s) = \frac{1}{(M + M_w)s} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $M$  は車体重量、 $M_w$  は車体慣性、 $P_{hyd}$  は油圧ブレーキのモデル、 $P_{motor}$  は電気ブレーキのモデル、 $\tau$  は外乱オブザーバの LPF のカットオフ周波数をあらわしている。

次に、油圧ブレーキ・電気ブレーキの応答特性を式 (8)(9) の一次遅れとして近似した上でシミュレーションを行った。

$$P_{hyd} = \frac{1}{\tau_{hyd}s + 1} \dots\dots\dots (8)$$

$$P_{motor} = \frac{1}{\tau_{motor}s + 1} \dots\dots\dots (9)$$

Fig.4 に  $\tau_{motor} = 1[\text{ms}], \tau = 1[\text{ms}], F_{hyd}^* + F_{motor}^* = -1000[\text{N}]$  とし油圧の制動力の不正確さを 5% として、油圧に定常誤差が存在するとしたときの指令値からのずれをシミュレーション結果として載せた。制動力指令値から油圧ブレーキと電気ブレーキへの指令値分離は周波数分離のコントローラを使っている。<sup>(5)</sup> ただし、外乱オブザーバによって推定された油圧は微分器を使って求めているため大きく変化することがある。これを防止するため推定値は油圧の指令値から 20% 以上はずれないものとしている。

これらを比較してやると、油圧ブレーキだけのときよりも電気ブレーキと油圧ブレーキを両方使っているときのほうが明らかに応答が早く、電気モータの補償の効果により正確な大きさの制動力が得られていることが分かる。まさにこのことは、応答が早く出力トルクが正確であるという電気モータの利点を活かして得られたものである。

そこで次節では、このモデルを使うことで制動時の速度制御が行えるかを検討する。

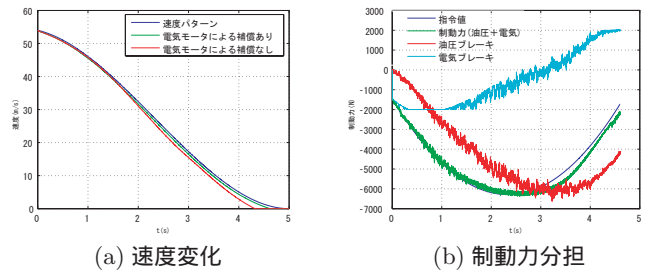


図 5 速度制御へ適用したときのシミュレーション結果 ( $V_0 = 15(m/s)$ )

Fig. 5. Simulation results of velocity control using proposed method

4.2 最適速度パターン制御に適用したシミュレーション結果 4.1 節において、油圧ブレーキを電気ブレーキで補償してやることで制動力を正確にだすことができたので、これを使うことで速度制御を適用してやりドライバーの負担を減らすことができると考えた。このとき入力には最適制御理論を用いて定量的に乗り心地の良い速度パターンを選ぶことにした。<sup>(6)</sup>

この時は出力する制動力の最高値が  $F = -2000[\text{N}]$  であると電気ブレーキだけでも実現できてしまうので、減加速度が大きい場合つまり電気モータのみでは制動できない場合を考える。

15[m/s] で走っている状態から、加速度が始めとと終わり  $-1[\text{m/s}^2]$  になるように 5[s] で速度を 0[m/s] にしようとするものにより実現し、速度パターンを生成し速度制御に適用した。

シミュレーション結果を Fig.5 に示した。ただし油圧ブレーキは力がよくわからないとしているので定期的な外乱として油圧の指令値から 10% の外乱を加えてある。電気ブレーキの飽和がある領域であるため電気ブレーキのみでは実現できない速度制御できない領域であるにもかかわらずほぼ追従性していることが分かる。また制動し始めは電気ブレーキが飽和してしまうことで制動力に少しのずれが生じてしまうが、補償なしに比べると飽和による影響が小さいことがわかる。また電気ブレーキはブレーキとしてだけでなく、駆動源としてもはたらくことで油圧ブレーキの補償を行っていることがわかる。

5. 電気自動車による制動実験

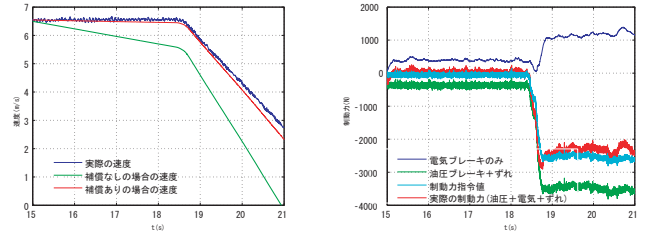
本研究室の保有する電気自動車の実験機<sup>”東大三月号 II”</sup>(Fig.6) を使うことで外乱オブザーバを使った電気ブレーキによる油圧ブレーキの補償について実験を行った。実験手法としては、アスファルトの路面を定常走行中に強めのブレーキをかけた。走行抵抗を考慮するためにある程度定常走行する区間を設けてある。

5.1 速度センサを用いた実験結果 実験の結果を Fig.7 に載せた。グラフを見ると時間遅れが小さいほど目



図6 実験車両・東大三月号 II

Fig. 6. UOT March II

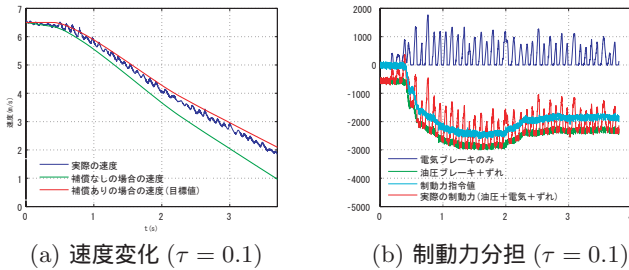


(a) 速度変化 ( $\tau = 0, 1$ )

(d) 制動力分担 ( $\tau = 0.1$ )

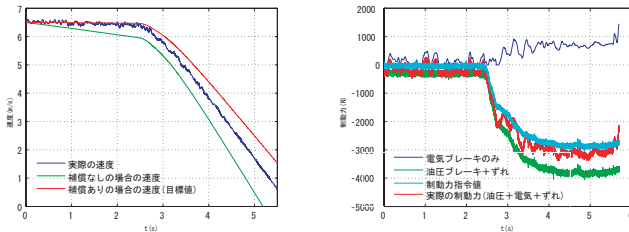
図8 加速度センサを用いて電気モータによる補償を行ったときの実験結果

Fig. 8. Experimental results of proposed method using acceleration sensor



(a) 速度変化 ( $\tau = 0.1$ )

(b) 制動力分担 ( $\tau = 0.1$ )



(c) 速度変化 ( $\tau = 0.1$  を二つ)

(d) 制動力分担 ( $\tau = 0.1$  を二つ)

図7 速度センサを用いて電気モータによる補償を行ったときの実験結果

Fig. 7. Experimental results of proposed method using velocity sensor

標の速度に追従していることがわかる。さらに、過渡的な変化に対して電気モータがずれをすばやく補償している様子もわかる。しかしながら、時間遅れが小さいと振動が大きくなり実際に適用することができなくなってしまった。この振動の原因として考えられるのは、速度センサから得られる情報を微分していることにあると考えられる。速度センサの情報はただでさえ微分されているのにそれをさらに微分するとなると大きな振動になってしまうので、時定数の大きなLPFをいれることで遅らせる必要がある。これでは、時間遅れが大きくなり電気モータの高速応答性を十分に活かすことが出来ない。

5・2 加速度センサを用いた実験結果 速度情報をつかって補償をする場合はFig.3において  $P_n = 1/(M+M_\omega)s$  としたが、加速度情報を用いる場合は  $P_n = 1/(M + M_\omega)$  としてやればよいので、微分項を含むことなく制御を行うことができる。そのため時間遅れが小さくても振動がでにくいと考えられる。

Fig.8 にその実験結果を載せた。速度、制動力の両方について補償により目標値に応答性よく追従していることが分かる。また、速度センサを使った場合に比べ時定数が小さい場合に関しても電気ブレーキへの入力の変動が小さくなっており十分実現可能であることがわかる。

問題としては、加速度センサのオフセットが少しでも違えばそのまま速度のずれにあらわれてしまうことがあげられ改善する必要がある。

## 6. 結論

本論文では、油圧アクチュエータよりもトルク応答がより高速かつ正確である電気モータを使うことによって油圧アクチュエータの制動力を電気モータで補償してやることを提案し速度制御に適用することでその有効性を示した。また、電気自動車による実験を行うことでその実現性を示した。

今後の課題としては、実験において速度センサを用いた場合は応答性に問題が加速度センサを用いた場合は追従性に問題が生じたので、速度センサ・加速度センサ両方を用いるこの欠点を克服できないか検討する必要がある。また、実験機の制約上油圧ブレーキが制御できなかったため周波数分離や電気モータの飽和を考えた場合の実験ができなかった。今後、油圧ブレーキがある程度制御できるような車両でも実験する必要もある。

## 文献

- (1) Hiroyuki Watanabe, "The Keyword of for the 21th Century -Hybrid-", The opening session of EVS17, 2000.
- (2) H.B.Pecejka and E Bakker, The Magic Formula tyre model, In Proc.1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, Delft, Netherlands, 1991.
- (3) 松田俊郎, "ABS の最新実用知識", 自動車工学, vol.11, pp30-67, 1990.
- (4) 日本エービーエス株式会社編, "自動車用 ABS の研究 Anti-lock Braking System", 山海堂, 1993.
- (5) Takahiro Okano, Shin-ichiro Sakai, Toshiyuki Uchida and Yoichi Hori, "Braking Performance Improvement for Hybrid Electric Vehicle Based on Electric Motor's Quick Torque Response", EVS19, 2002.
- (6) タイチェンファ, "速度パターンを導入した電気自動車の新しい運動制御の手法の提案", 2003.