

電気モータの高速応答を利用した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)

Abstract

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.

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, 速度制御
(electric vehicle, braking system, disturbance observer, velocity control)

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。⁽¹⁾

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。この電気モータの運動制御における特徴とは、

- (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。

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

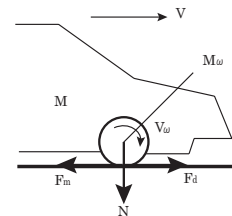


図 1 車両の一輪モデル

Fig. 1. One tire model of vehicle

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して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_ω は車輪速度、 F_d はタイヤから路面に伝わる力、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、

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

$$M_\omega \frac{dV_\omega}{dt} = F_m - F_d(\lambda) \dots \dots \dots (2)$$

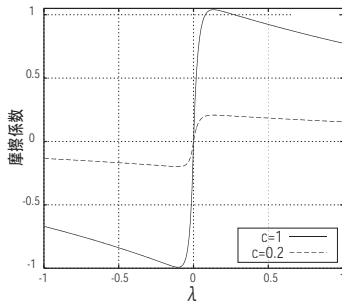


図2 μ-λ 曲線
Fig. 2. μ-λ curve

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 λ の関数としているが、 λ とはスリップ率のことで式 (3)(4) と定義されている。

$$\lambda = \frac{V_w - V}{V_w} : (V_w > V) \dots \dots \dots (3)$$

$$\lambda = -\frac{V - V_w}{V} : (V > V_w) \dots \dots \dots (4)$$

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 λ と摩擦係数 μ の関係をあらわす μ - λ 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。(2) ここでは式 (5)(6) とした。

$$\mu = -c \times 1.1(e^{-35\lambda} - e^{-0.35\lambda}) : V_w > V \dots \dots \dots (5)$$

$$\mu = c \times 1.05(e^{45\lambda} - e^{0.45\lambda}) : V > V_w \dots \dots \dots (6)$$

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 μ - λ 曲線を示した。

スリップ率と μ - λ 曲線から摩擦係数 μ が得られ、式 (7) により駆動力 F_d が求まる。

$$F_d = \mu(\lambda)N \dots \dots \dots (7)$$

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とができるからである。(3) (4)

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と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。

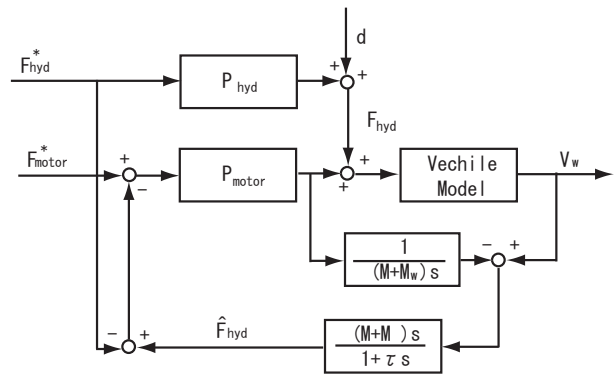


図3 車体のノミナルモデルを用いた油圧ブレーキの補償ブロック図

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

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。

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 (8) としている。

$$P_n(s) = \frac{1}{(M + M_w)s} \dots \dots \dots (8)$$

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、 τ 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

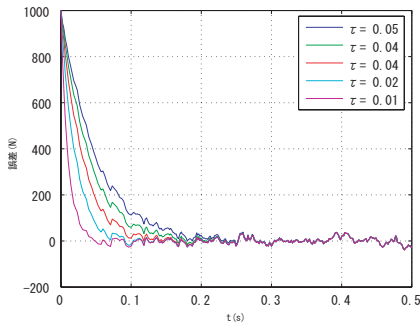


図 4 油圧ブレーキのみの場合の指令値からの誤差
Fig. 4. Simulation result of braking system only using hydraulic actuator

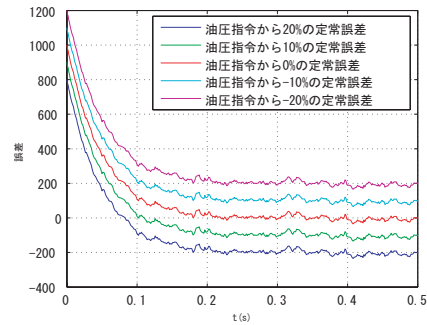


図 6 定常誤差に対する油圧ブレーキのみの場合の指令値からの誤差
Fig. 6. Simulation result of braking system only using hydraulic actuator

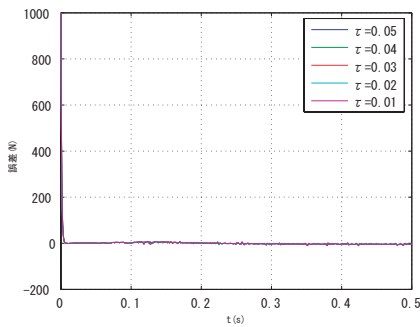


図 5 車体のノミナルモデルを用いて油圧ブレーキを補償した場合の指令値からの誤差 (電気 + 油圧ブレーキ)
Fig. 5. Simulation result of braking system using vehicle nominal model

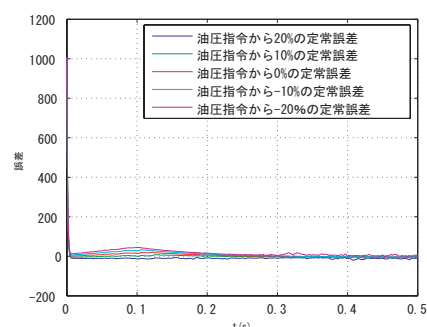


図 7 定常誤差に対する車体のノミナルモデルを用いて油圧ブレーキを補償した場合の指令値からの誤差 (電気 + 油圧ブレーキ)
Fig. 7. Simulation result of braking system using vehicle nominal model

いる。

次に、油圧ブレーキ・電気ブレーキの応答特性を式 (9)(10) 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。

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

$$P_{motor} = \frac{1}{\tau_{motor}s + 1} \dots\dots\dots (10)$$

Fig.4, Fig.5 に $\tau_{motor} = 1[ms], \tau = 1[ms], F_{hyd}^* + F_{motor}^* = -1000[N]$ とし油圧の制動力の不正確さを 5% として、 τ_{motor} をパラメータとして変動させ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。⁽⁵⁾ 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。

Fig.4 と Fig.5 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。

また油圧ブレーキは定常的なずれを生じている場合についてのシミュレーション結果を Fig.7, Fig.6 に示した。これらのグラフにより、定常的な誤差も電気モータにより補償されていることが分かる。

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。

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 制動時において、ブレーキのかけはじめ及び低速時におけるブレーキは非連続的なジャークを生みやすいため乗り心地に影響しやすい。このときドライバーは無意識にのうちに乗り心地の良いように速度をコントロールしているが、この無意識のコントロールは運転において大きく気を使うところである。

前節において、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より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

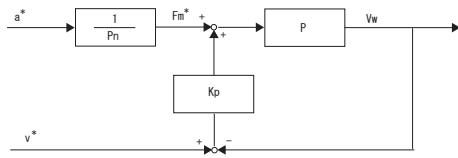


図 8 速度制御のブロック図
Fig. 8. Block diagram of velocity control

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。

最適制御理論においては評価関数 J は式 (11) 用い、車体速度 v と加速度 a を状態変数として状態方程式をたて、ハミルトニアン H 式 (12) をつくる。そしてこの H の停留条件 $\frac{\partial H}{\partial \lambda} = 0$ と境界条件を考えることで乗り心地の良い速度パターンをつくりだす。(6)

$$J = \int_0^{t_f} \left(\frac{da}{dt}\right)^2 dt \dots\dots\dots (11)$$

$$H = \frac{1}{2}u^2 + \lambda^T(Ax + Bu) \dots\dots\dots (12)$$

今回の速度制御のブロック図を Fig.8 に示した。 P, P_n とはそれぞれ制御対象プラントとノミナルプラントとなっており、車体の質量を M とすると $P = \frac{1}{(M+M_\omega)s}$, $P_n = \frac{1}{(M_n+M_{\omega n})s}$ と考えることができる。ここでは速度をフィードバックだけでなく加速度のフィードフォワードも利用している。これは速度および加速度パターンを入力として、フィードフォワードとフィードバックの組合せからなる制御系は、パターンに対する追従性と外乱に対するロバスト性両方面の要求に応えられるとされるからである。(6)

フィードバック制御器 K_p にはゲインのみを用い、このときの速度指令から速度までの伝達関数は式 (13) と表される。

$$\frac{v}{v^*} = \frac{(M_n + M_{\omega n})s + K_p}{(M + M_\omega)s + K_p} \dots\dots\dots (13)$$

シミュレーションの境界条件としては $10[m/s]$ で走っている状態から、加速度が始めと終わりで $0[m/s^2]$ になるように $10[s]$ で速度を $0[m/s]$ にしようとするもので式で表すと式 (14)(15) のようになる。

$$t = 0 : v_0 = 0, a_0 = 0 \dots\dots\dots (14)$$

$$t_f = 10 : v_f = 0, a_f = 0 \dots\dots\dots (15)$$

これによって作り出された速度パターンを Fig.8 の速度制御に適用した。

シミュレーション結果を Fig.9 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常的な外乱として油圧のブレーキ力の 10 %の外乱を加えてある。加えている。このグラフより電気モータの補償のない場合は誤差のため指令値である速度パターンからずれているが、補償がある場合はパターンにほぼ追従していることがわかる。これより電気モータで補償を行うことにより速度制御が実現できることがわかった。

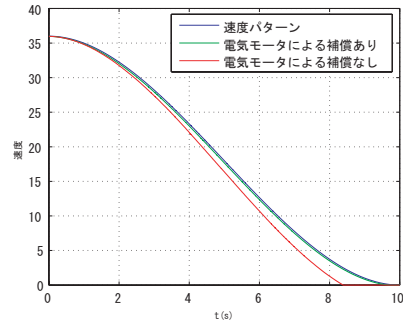


図 9 速度制御へ適用したときのシミュレーション結果
Fig. 9. Simulation result of velocity control



図 10 実験車両・東大三月号 II
Fig. 10. UOT March II

5. 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。

現在、実験車両である東大三月号 II (Fig.10) を用いた実験により油圧による制動力を推定することでその実現性について検証中である。今後は、実験において推定値をフィードバックすることで制動力を制御し速度制御への適用なども検討する必要がある。

参考文献

- (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.