

- 卒業論文 -

電気モータの高速応答を活かした
電気自動車のブレーキ性能の向上

平成18年2月13日提出

指導教員: 堀 洋一 教授

東京大学工学部電気工学科

40353 小池 卓志

内容梗概

現在、エネルギー問題などによりエネルギー効率のよい電気モータを使ったHEV自動車の普及が広まってきている。HEV自動車においては、電気モータをブレーキとして用いることによりエネルギー効率を改善している。しかしながら、電気モータは制御面での利点をもっているがここではエネルギー効率の面だけしか活かしていない。

そこで本論文では、電気自動車において大きな力は発揮できないが応答が高速かつ正確な電気ブレーキで非線系性を有する油圧ブレーキを補償してやることによりブレーキ性能の向上をはかることを目的とした。

手法としては、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外乱オブザーバでそのずれを推定することで電気ブレーキにフィードバックするというような電気ブレーキを補償的に使う制御を提案する。そのときの制動力指令値は周波数分離のコントローラを使うことで指令値を油圧ブレーキと電気ブレーキに分担させた。また、その中で電気ブレーキの出力の飽和についても考えた。

提案手法については、シミュレーションで有効性を示した。またその実現性について研究室で保有している実験車両”東大三月号 II” を用いて検討を行った。

目次

第1章	序論	2
1.1	研究の背景	2
1.2	研究の目的	3
1.3	本論文の構成	3
第2章	電気自動車の一次元運動特性と現行のブレーキ	4
2.1	電気自動車の一次元運動モデル	4
2.2	現行のブレーキ	5
2.2.1	車両運動制御における油圧ブレーキ	5
2.2.2	車両運動制御における電気ブレーキの優位性とその限界	6
2.2.3	油圧ブレーキと電気ブレーキの比較とその問題点	7
2.3	油圧ブレーキと電気ブレーキによる協調制動の提案	7
第3章	電気自動車における油圧ブレーキと電気ブレーキによる協調制動	8
3.1	はじめに	8
3.2	周波数分離を用いた協調制動	8
3.2.1	制御器の構成	8
3.2.2	車体モデルへの適用したシミュレーション結果	9
3.2.3	電気ブレーキの飽和を考慮した場合	11
3.3	車体ノミナルモデルを用いた電気ブレーキによる油圧ブレーキ補償の提案	12
3.3.1	油圧ブレーキの性質	12
3.3.2	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	12
3.3.3	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	15
第4章	電気ブレーキによる補償を適用した電気自動車の制動実験	19
4.1	実験機”東大三月号 II”について	19
4.2	”東大三月号 II”による実験	19
4.2.1	実験手法	19
4.2.2	速度センサを用いた実験結果	20
4.2.3	加速度センサを用いた実験結果	22
第5章	結論	23
5.1	まとめ	23
5.2	今後の課題	23
	謝辞	25

参考文献	26
発表文献(予定)	27

第1章 序論

1.1 研究の背景

自動車の普及はわれわれの生活を便利で豊かなものにしてくれ、今日の社会の中ではなくてはならない存在になっている。その一方で、自動車の普及はエネルギー資源の使用を増加させており、エネルギー問題や温暖化など地球規模での環境問題の原因ともなっている。Fig.1.1 には日本における 2001 年度の部門別の CO₂ 排出量割合を、Fig.1.2 にはそのうち運輸部門における CO₂ 排出量割合を示した。これらによると、全体の CO₂ 排出量の 2 割が運輸部門でそのうちの約 9 割が自動車の排出であることがわかる [1]。

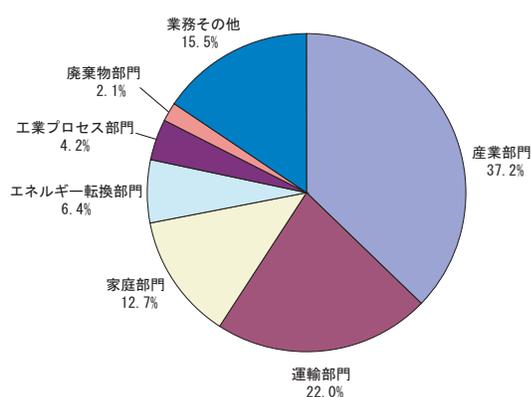


Fig. 1.1: 2001 年度 部門別 CO₂ 排出割合

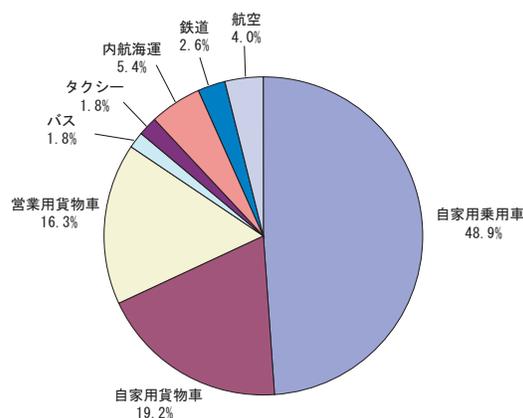


Fig. 1.2: 2001 年度 運輸部門 CO₂ 排出割合

その中、企業の環境問題への関心の高まりから内燃機関よりも高効率で CO₂ の排出も少ない電気モータを使った電気自動車、ハイブリッド車の開発がおこなわれ販売されるようになった。そして最近の石油の値段の高騰により、低燃費のハイブリッド車の人気が出てきている。とりわけ 2004 年の「北米カー・オブ・ザ・イヤー」に選ばれたトヨタ自動車の「プリウス」は大人気で、生産が追いつかないほどである。米国ではいまハイブリッド車ブームが起こっている。この低燃費で環境にやさしい車の人気はこのまま続くと考えられる。それに対し、純粋な電気自動車はまだ広く普及するにはいたっていない。これは充電機のコストが高い・充電機の容量が少ない・インフラの整備が整っていないなどの理由が考えられる。

これらの電気モータを使っているハイブリッド車、純電気自動車は高効率であることだけが特徴であるわけではない。内燃機関と比べたときの特徴は、

- トルク応答が高速かつ正確である
- 出力トルクの大きさが正確に把握できる
- モータを各輪に分散配置できる

といったものがあげられる。よって電気モータを駆動源として利用すれば、電気モータが持つ制御面での利点を十分活かすことができる。

1.2 研究の目的

現在の自動車のブレーキは基本的に油圧アクチュエータが使われているが、自動車のエネルギー効率改善のためにハイブリッド車等において電気モータが使われるようになってきている。欧州や米国では応答性の向上をねらって、電気モータを使用して直接ブレーキ力を制御するブレーキバイワイヤの開発が進められ、一部採用されてきている [2]。

本研究では、その電気モータをエネルギー効率の観点だけではなく、先ほどあげた電気モータの制御面での利点を活かすことでブレーキ性能の向上をはかることを目的とする。

現在の自動車には ABS、TCS などに代表される車両運動制御装置が搭載されるようになってきている。ABS は制動時の急なブレーキングによるタイヤのロックを回避するシステムで、油圧システムをソレノイドバルブで切り替えることでブレーキトルクを制御している。しかしながら、油圧ブレーキはブレーキパットなどを介してトルクを出力するため、電気モータに比べると応答速度・出力トルクの正確性に劣る。

そこで本研究では油圧アクチュエータに比ベトルクの応答性が速く正確である電気モータをブレーキとして利用することで更なるブレーキ性能向上について考える。しかし、電気モータだけでは十分な力が発揮できないのでブレーキの機能を実現することができない。そのためここでは従来の油圧アクチュエータと電気モータの協調制御を用いたブレーキングを考える。

1.3 本論文の構成

本章では、電気モータの制御面での利点をあげることで電気自動車の制御面での可能性を述べた。第 2 章では、車体の運動モデルを説明し、そのあとで現在のブレーキについて述べ油圧ブレーキと電気ブレーキの協調制動の提案する。第 3 章では、油圧ブレーキと電気ブレーキの協調制動の手法として周波数分離・外乱オブザーバを用いた手法について提案、シミュレーションをおこなう。第 4 章では、第 3 章で提案した手法についての実験機を使った実験結果および考察を述べる。最後に第 5 章では、本論文の結論と今後の課題を述べる。

第2章 電気自動車の一次元運動特性と現 行のブレーキ

2.1 電気自動車の一次元運動モデル

車両の運動を考えると、タイヤ輪を取り出して考えたものが車体の一輪モデルである。そのモデルを Fig.2.1 に示した。 M は車両重量、 V は車体速度、 V_w 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。

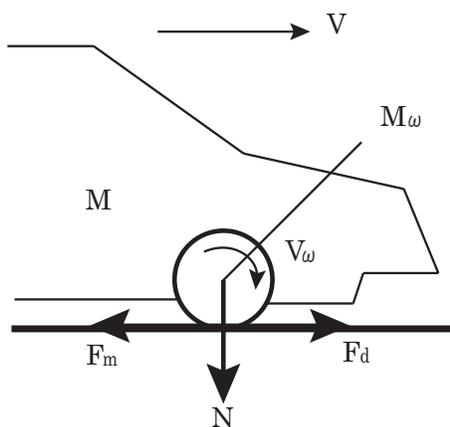


Fig. 2.1: 車両の一輪モデル

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、

$$M \frac{dV}{dt} = F_d(\lambda) - F_a \quad (2.1)$$

$$M_w \frac{dV_w}{dt} = F_m - F_d(\lambda) \quad (2.2)$$

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 λ の関数としているが、 λ とはスリップ率のことで式 (2.3)(2.4) と定義されている。

$$\lambda = \frac{V_w - V}{V_w} : (V_w > V) \quad (2.3)$$

$$\lambda = -\frac{V - V_w}{V} : (V > V_w) \quad (2.4)$$

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、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 $\mu - \lambda$ 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 [3]。ここでは式 (2.5)(2.6) とした。

$$\mu = -c \times 1.1(e^{-35\lambda} - e^{-0.35\lambda}) : V_w > V \quad (2.5)$$

$$\mu = c \times 1.05(e^{45\lambda} - e^{0.45\lambda}) : V > V_w \quad (2.6)$$

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.2.2 に $\mu - \lambda$ 曲線を示した。

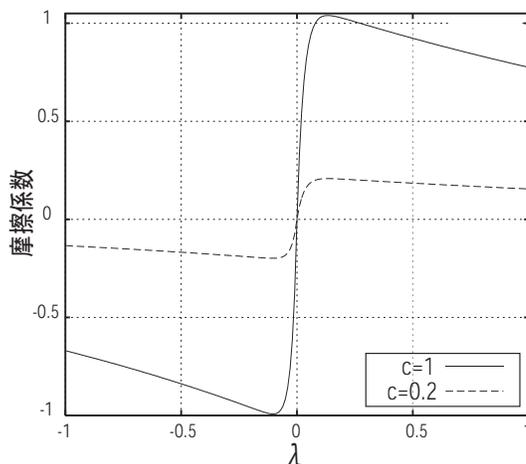


Fig. 2.2: $\mu - \lambda$ 曲線

スリップ率と $\mu - \lambda$ 曲線から摩擦係数 μ が得られ、式 (2.7) により駆動力 F_d が求まる。

$$F_d = \mu(\lambda)N \quad (2.7)$$

2.2 現行のブレーキ

2.2.1 車両運動制御における油圧ブレーキ

油圧ブレーキの特徴をまとめると下のようになる。

- 大きな力が出せる
- 正確な制動力が把握できない
- 応答が電気モータに比べて遅い
- 制動方向にしか出力できない

油圧ブレーキはブレーキパッドを介して制動力として出力されるが、ブレーキパッドの伝達関数は温度や磨耗の具合などにより変化する。このために制動力ははっきりとわから

ないし、応答も数 10[ms] 程度と電気モータに比べて遅い [4]。さらに当然のことながら力は制動方向にしか力を出せない。このため制御を行おうとすると連続的にフィードバックして制御を行うことは困難で、bang-bang 制御に頼らざるを得ない。このことは制動をかけたはじめたときの運動に影響をあたえられ考えられる。また制動方向にしか力がだせないため、空転検出後からの脱出が遅れることになる。

2.2.2 車両運動制御における電気ブレーキの優位性とその限界

電気モータをブレーキとしてみたときの特徴は油圧ブレーキと比較して下のよう表せる。

- 十分なトルクが発揮できない
- 制動力が正確に把握できる
- 応答が速い
- 制動、駆動ともに可能

電気モータのトルク応答は、油圧ブレーキ・エンジンなどと比較して優れており、応答時間は 1[ms] 程度である。そしてブレーキパットなどを介さないため実際の制動力を正確に把握することができる。そのため連続的にフィードバックを行うことができ、正確な制御を行うことが可能である。しかしながら、電気モータ単独では十分なトルクが発揮できない。

表 2.1 に現在市販されている EV/HEV/FCEV の電気モータ最大出力と最大トルクを載せた。これによると最大のトルクをだすことのできる Prius で 350[Nm] であり、もしこのトルクがブレーキで出せたとしてもタイヤ半径 0.25[m]、車体重量 1000[m] とすると最高で約-0.5[g] の減加速度までしか実現できない。よって急ブレーキをかけようとする場合、電気モータだけでは十分な制動力は得られない。

表 2.1: 市販されている EV/HEV/FCEV の電気モータ最大出力と最大トルク

車種 (メーカー名)	最高出力 [kW]	最大トルク [Nm]
Prius(Toyota)	33[kW]	350[Nm]
Estima Hybrid(Toyota)	Front13[kW],Rear18[kW]	Front 110[Nm],Rear108[Nm]
Insight(Honda)	10[kW]	49[Nm]
Civic Hybrid(Honda)	10[kW]	49[Nm]
March e-4WD(Nissan)	3.3[kW]	10[Nm]
FCX(Honda)	60[kW]	272[Nm]
FCHV(Toyota)	80[kW]	260[Nm]
RAV4 L V EV(Toyota)	50[kW]	190[Nm]
Hyper Mini(Nissan)	24[kW]	130[Nm]

2.2.3 油圧ブレーキと電気ブレーキの比較とその問題点

油圧ブレーキと電気ブレーキの比較をするにあたり、プラントのモデルについて考える。応答の遅れについて述べるので、応答の無駄時間と遅れ時定数を考えると式 (2.8) のように表せられる。

$$P(s) = e^{-\tau_D} \frac{1}{\tau_m s + 1} \quad (2.8)$$

Fig.2.3 に油圧ブレーキと電気ブレーキのプランとモデルにステップ状の入力を入れたときの出力の様子を示した。ここでは、油圧ブレーキの無駄時間 $\tau_D=20$ [ms], 遅れ時定数 $\tau_m=50$ [ms]、電気ブレーキの無駄時間 $\tau_D=0$ [ms], 遅れ時定数 $\tau_m=1$ [ms] として考えた。また、油圧ブレーキには制動力の不確かさが存在するため入力 F_{in} の 5% のノイズをいれている。

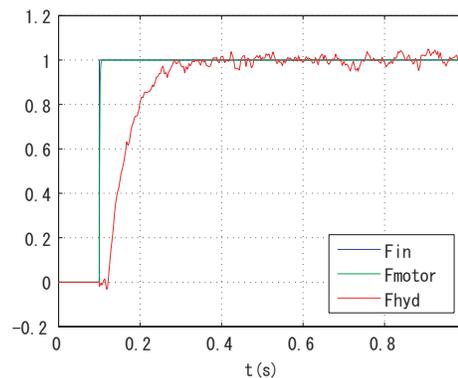


Fig. 2.3: 油圧ブレーキと電気ブレーキの step 入力に対する応答

この図から電気モータは非常に応答性がよく正確であるのに対し、油圧ブレーキは応答性や正確性に劣っていることがみてとれる。

2.3 油圧ブレーキと電気ブレーキによる協調制動の提案

油圧ブレーキは大きい力が出るが応答性、正確性に欠ける。それに対して、電気ブレーキは応答性、正確性はよいが、小さい力しかだすことができない。そこで油圧ブレーキと電気ブレーキの両方を用いることにより、お互いの欠点を埋め合わせる協調制動することによりよいブレーキを実現する方法を考える。Fig.2.4 にその概念図を示した。

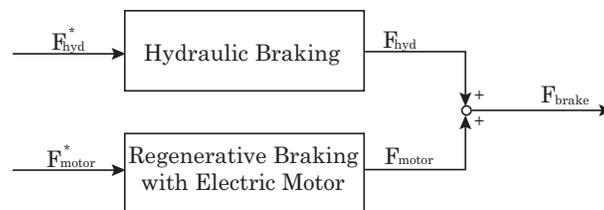


Fig. 2.4: 油圧ブレーキと電気ブレーキの協調制動の概念図

第3章 電気自動車における油圧ブレーキと電気ブレーキによる協調制動

3.1 はじめに

本章ではまず、油圧ブレーキと電気ブレーキによる協調制動を行う際に制動力指令値をいかに分担するかを考える。ここでは応答速度の遅い油圧ブレーキに低周波域を、応答速度の速い電気ブレーキに高周波域を分担することで制動力指令値を分けてやる周波数分離を用いた方法を説明する [5]。

そしてそれに続け、周波数分離によってそれぞれに与えられた制動力指令値を油圧、電気ブレーキに入力する。しかしこのとき、油圧ブレーキは正確な制動力を発揮することができない。これを解決するため油圧ブレーキの制動力とのずれを外乱とみなしてやり外乱オブザーバによってずれを推定し電気ブレーキによって補償する方法を提案する。

3.2 周波数分離を用いた協調制動

3.2.1 制御器の構成

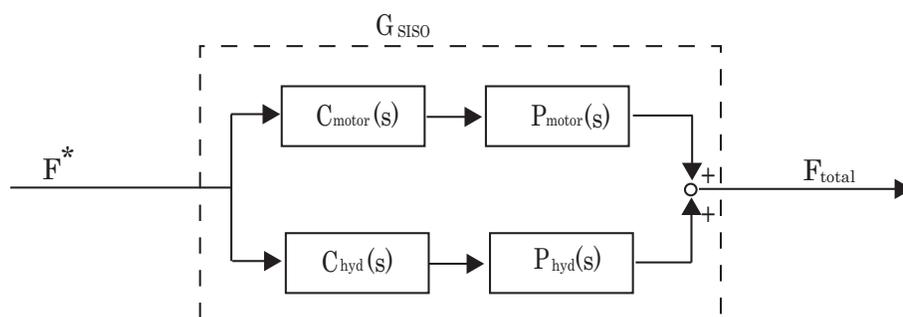


Fig. 3.1: 周波数分離を用いた協調制動

まず制動力指令値を油圧ブレーキ、電気ブレーキにいかに分担するかを考える。油圧ブレーキは応答速度が遅いが大きな力が出せる。電気ブレーキは大きな力を出せないが応答速度が速い。この性質を活かし油圧ブレーキには低周波域を、電気ブレーキには高周波域を分担させることで、より大きな力が出せかつ高速な応答をするブレーキを構成することが出来る [5]。

その様子を Fig.3.1 に示した。図の $P_{motor}(s)$, $P_{hyd}(s)$ はそれぞれ電気ブレーキと油圧ブ

レーキのプラントモデルをあらわしており、それぞれ式 (3.1),(3.2) と考える。

$$P_{motor}(s) \simeq \frac{1}{1 + \tau_{motor}s} \simeq 1 \quad (3.1)$$

$$P_{hyd}(s) \simeq \frac{1}{1 + \tau_{hyd}s} \quad (3.2)$$

ここで G_{SISO} を式 (3.3) となるように設計することで、追従性を保つ。

$$G_{SISO} = C_{motor}P_{motor} + C_{hyd}P_{hyd} = 1 \quad (3.3)$$

C_{motor}, C_{hyd} はそれぞれアクチュエータの作動周波数を分離するためのフィルタで、 C_{motor} に HPF、 C_{hyd} に LPF を用いることで、ブレーキ力の高周波分はモータに、低周波分は油圧に分担している。

式 (3.3) より C_{motor}, C_{hyd} はそれぞれ式 (3.4)(3.5) と表現できる。ただし、この式の $\frac{1}{\tau}$ は HPF、LPF のカットオフ周波数を表している。

$$C_{motor}(s) = \frac{\tau s}{\tau s + 1} \quad (3.4)$$

$$C_{hyd}(s) = \frac{1}{\tau s + 1}(1 + \tau_{hyd}s) \quad (3.5)$$

実際に値を代入して周波数分離を用いたときの協調制動による step 応答を調べた。ただし、 $\tau_{motor}=1[\text{ms}], \tau_{hyd}=50[\text{ms}]$ として考え、周波数分離の時定数は $\tau=1[\text{s}]$ とした。

Fig.3.2 にその様子を示した。協調制動をした場合の応答は油圧だけの場合に比べかなり早くなっていることがわかる。

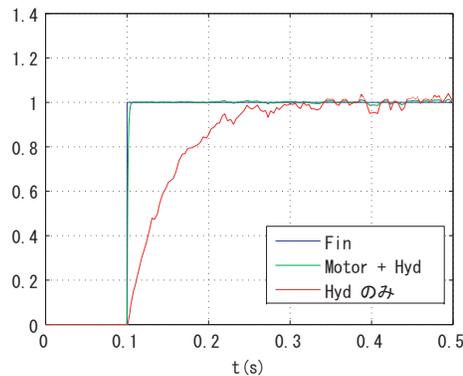
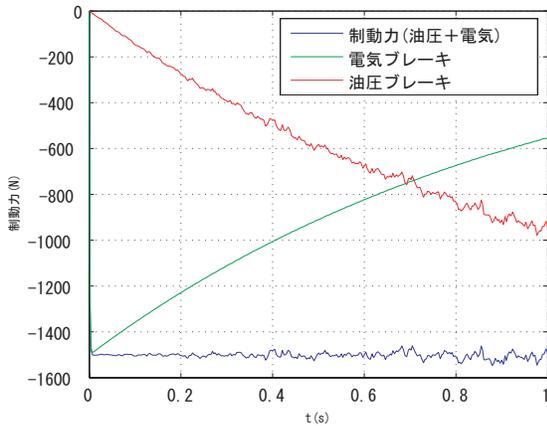


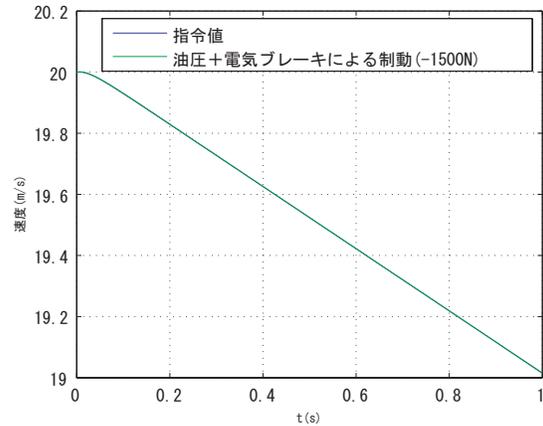
Fig. 3.2: 周波数分離を用いた協調制動における step 応答

3.2.2 車体モデルへの適用したシミュレーション結果

次に 2.1 節の車体モデルに周波数分離の協調制動を適用し Matlab でシミュレーションを行った。普通にブレーキをかけたときの減加速度-0.1[g] 程度の制動力入力-1500[N] を加えた場合の結果を Fig.3.3 に、スリップしない程度の急ブレーキをかけたときの減加速度-0.3[g] 程度の制動力入力-4500[N] を加えた場合の結果を Fig.3.4 に示した。また制動力指令値はステップ入力とした。

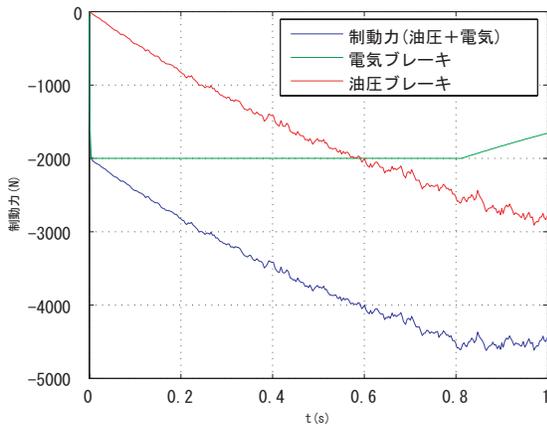


(a) 油圧、電気ブレーキの制動力

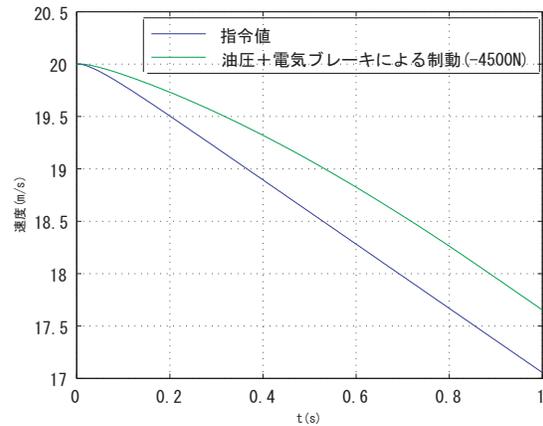


(b) 周波数分離をおこなったときの速度変化

Fig. 3.3: 制動力指令値-1500[N] の場合 (飽和なし)



(a) 油圧、電気ブレーキの制動力



(b) 周波数分離をおこなったときの速度変化

Fig. 3.4: 制動力指令値-4500[N] の場合 (飽和あり)

ただし、電気ブレーキの出力し得るトルクには限度があるので-2000[N] までしか力を出せないものとしている。

制動力指令値が-1500[N] のときは Fig.3.3(a) より電気モータは-2000[N] を超えることがないので周波数分離によって正しく制動力が分担できているのがわかる。そのため Fig.3.3(b) において速度が指令値に正しく追従している。

一方、制動力指令値が-4500[N] のときは Fig.3.4(a) より電気モータは-2000[N] 以上の力を分担するので飽和がおき制動力指令値からずれが生じてしまっている。そのため Fig.3.4(b) では速度変化に遅れが生じてしまっている。

3.2.3 電気ブレーキの飽和を考慮した場合

前小節では、電気モータの飽和によって思ったような制動力がえられなかったので電気モータの飽和を考慮することで制動力の誤差をなくすことを考える。

Fig.3.5 にそのブロック図を表した。単純に電気モータで発生できない制動力を油圧によって補うというものである。

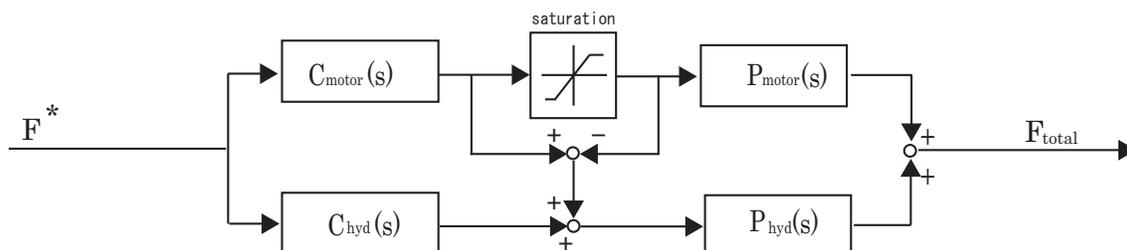
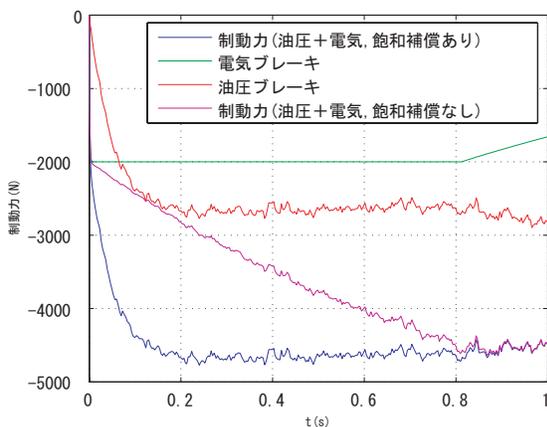
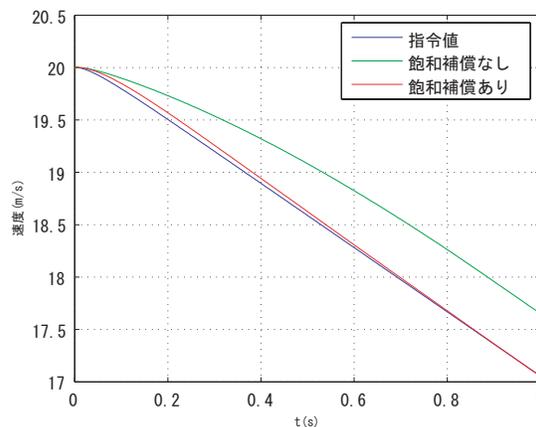


Fig. 3.5: 電気ブレーキの飽和を考慮した場合のブロック図

シミュレーション結果を Fig.3.6 に示した。Fig.3.6(a) により、電気ブレーキが飽和しているとき油圧ブレーキにより力を補うことで制動力を指令値通りにさせていることがわかる。それにより Fig.3.6(b) において速度も指令値に追従できている。



(a) 油圧、電気ブレーキの制動力



(b) 周波数分離をおこなったときの速度変化

Fig. 3.6: 電気モータの飽和を補償を考慮して制動力指令値-4500[N] を入れた場合

本章では周波数分離を用いることで制動力指令値を油圧ブレーキと電気ブレーキに上手く分担させることで減速度を上手くコントロールすることができた。しかしながら実際問題において、油圧ブレーキの制動力は正確にコントロールすることができない。そのため、今までのようにフィードフォワードだけでは減速度をコントロールすることは難しい。そこで次節では、電気ブレーキによるフィードバックを用いることで減速度をコントロールする手法を提案する。

3.3 車体ノミナルモデルを用いた電気ブレーキによる油圧ブレーキ補償の提案

3.3.1 油圧ブレーキの性質

現在、ブレーキとして多く使われているのは油圧ブレーキである。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 [6][7]。

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。この非線系性は、実際に制動力を出すブレーキパッドに原因があると考えられる。これはブレーキパッドが過熱されたり磨耗してしまうことで摩擦係数が減少してしまうからである。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き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。

このことは3.2節で述べた周波数分離を用いた協調制動においてもいえることで、制動力指令値をいかに上手く分担したところで油圧による制動力が正確に出せない場合、減速度など車両の運動をコントロールすることができないと考えられる。

そこで本節では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について提案を行う。

3.3.2 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

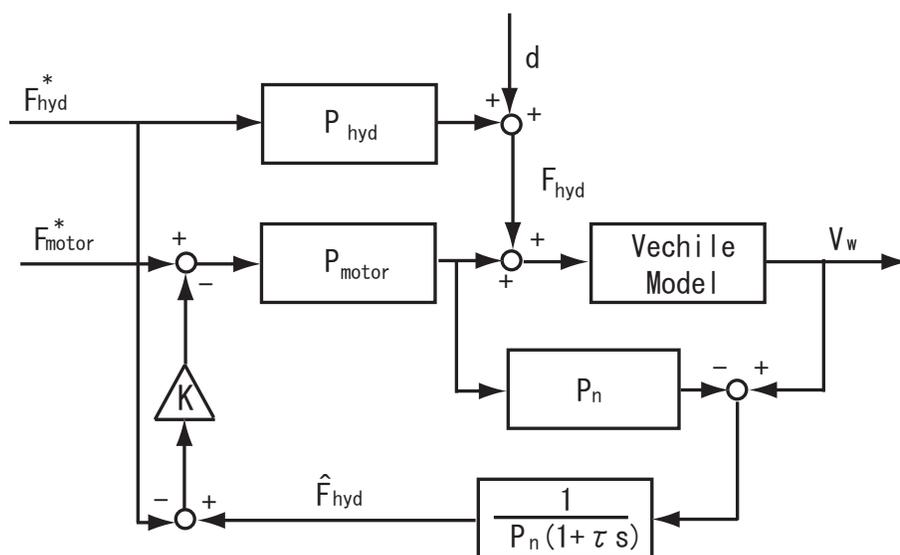


Fig. 3.7: 車体のノミナルモデルを用いた油圧ブレーキの補償ブロック図

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.3.7にそのブロック図を示した。ただし、 P_n は車体のノミナルモデル、 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いる。

車体のノミナルモデル

ここで車体のノミナルモデル P_n について考えることにする。2.1節にタイヤの粘着特性による一般的なモデリングについて述べたが、これはタイヤについてのモデルを簡略化したとはいっても数学的には複雑で非線形であった。そこで、このモデルを線形化することで車体のノミナルモデルに利用することを考える。

まず非線形の大きな原因となっているのは Fig.2.2 の $\mu - \lambda$ 曲線によるものであるので、あるスリップ率 λ_0 における駆動力係数 μ の傾きを式 (3.6) a と定義する。

$$a = \left. \frac{d\mu}{d\lambda} \right|_{\lambda_0} \quad (3.6)$$

また式 (2.4) を全微分してやることで線形化してやると式 (3.7) と表せる。

$$\begin{aligned} d\lambda &= \frac{\partial \lambda}{\partial V_\omega} dV_\omega + \frac{\partial \lambda}{\partial V} dV \\ &= \frac{1}{V_0} dV_\omega - \frac{V_{\omega 0}}{V_0^2} dV \end{aligned} \quad (3.7)$$

次に、式 (2.1),(2.2) の車体の運動方程式について線形化をしてやると式 (3.8),(3.9) のようになる。

$$Ms dV = dF_d \quad (3.8)$$

$$M_\omega s dV_\omega = dF_m - dF_d \quad (3.9)$$

さらに式 (2.4) より式 (3.10) とできる。

$$\frac{V_{\omega 0}}{V_0} = 1 + \lambda_0 \quad (3.10)$$

そしてこれらの式 (3.6) ~ 式 (3.10) をまとめてやることで、モーターのトルク制動力入力 F_m から車輪速度 V_ω の伝達関数が式 (3.11) としてやることができる。

$$\begin{aligned} \frac{dV_\omega}{dF_m} &= \frac{\frac{\tau_\omega}{(1+\lambda_0)^2} s + 1}{\frac{\tau_\omega M_\omega}{(1+\lambda_0)^2} s^2 + (M_\omega + \frac{M}{1+\lambda_0}) s} \\ &= \frac{1}{(M_\omega + \frac{M}{1+\lambda_0}) s} \cdot \frac{\frac{\tau_\omega}{(1+\lambda_0)^2} s + 1}{\frac{\tau_\omega M_\omega}{(1+\lambda_0)^2 (M_\omega + \frac{M}{1+\lambda_0})} s + 1} \end{aligned} \quad (3.11)$$

ただし τ_ω は、

$$\tau_\omega = \frac{MV_{\omega 0}}{aN} \quad (3.12)$$

とした。

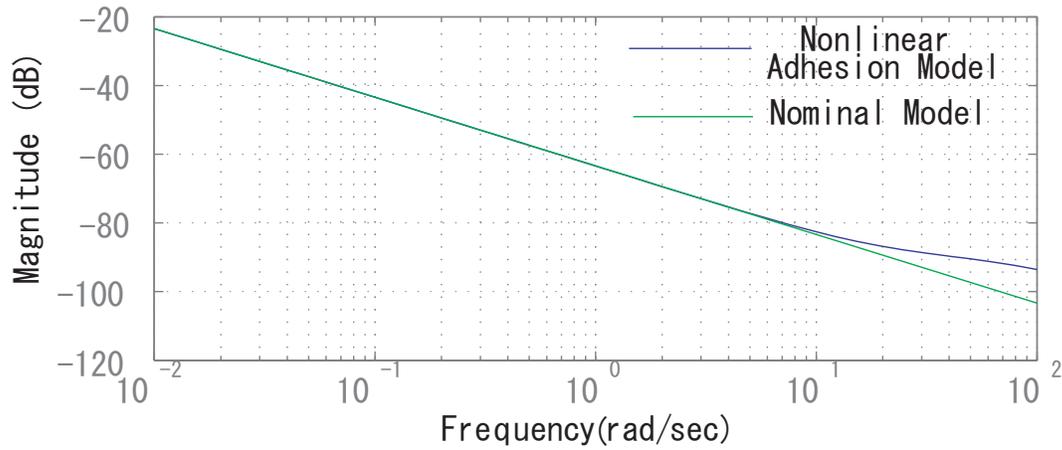


Fig. 3.8: 粘着時におけるモータ制動力から車輪速度までの周波数特性

式 (3.11) の周波数特性を Fig.3.8 に示した。ただしこのとき $a = 21.5, \lambda = -0.01$ として考えている。これより周波数があまり高くない部分ではほぼ積分特性となっている。これは式 (3.11) において代表根だけをとりだして考えた場合からも分かる。

ゆえにモータ制動力から車輪速度までのノミナルモデル P_n は式 (3.13) と表せる。

$$\begin{aligned}
 P_n &= \frac{1}{(M_\omega + \frac{M}{1+\lambda_0})s} \\
 &\simeq \frac{1}{(M_\omega + M)s} : (\because \lambda_0 \simeq 0(\text{粘着時}))
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

シミュレーション結果

次に、このノミナルモデルをつかって油圧ブレーキ・電気ブレーキの応答特性を式 (3.14)(3.15) 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。

$$P_{hyd} = \frac{1}{\tau_{hyd}s + 1} \tag{3.14}$$

$$P_{motor} = \frac{1}{\tau_{motor}s + 1} \tag{3.15}$$

Fig.3.9, Fig.3.10 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、 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.3.9 と Fig.3.10 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.3.11, Fig.3.12 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。

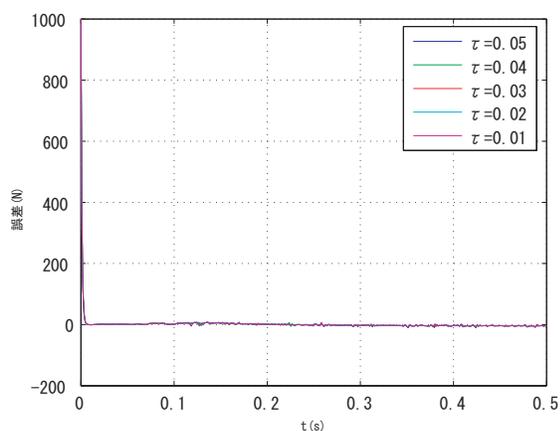
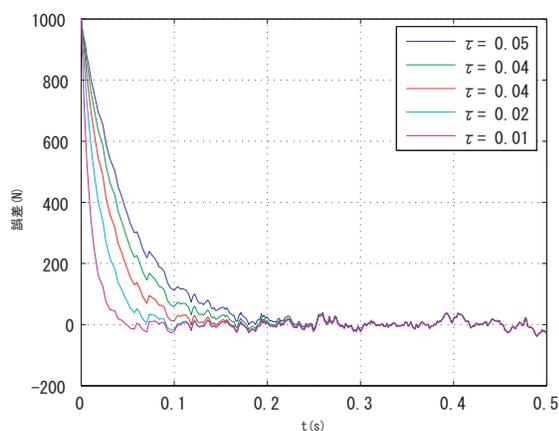


Fig. 3.9: 油圧ブレーキのみの場合の指令値からの誤差 Fig. 3.10: 車体のノミナルモデルを用いて油圧ブレーキを補償した場合の指令値からの誤差 (電気 + 油圧ブレーキ)

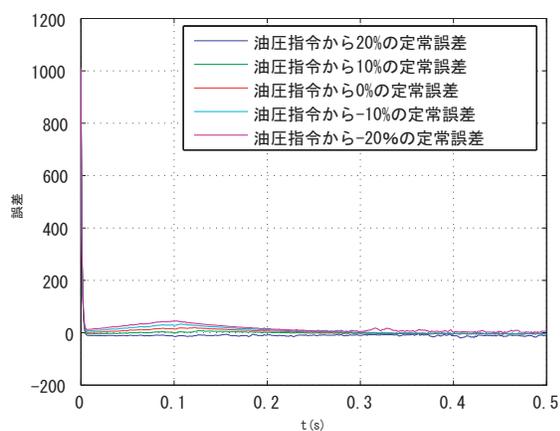
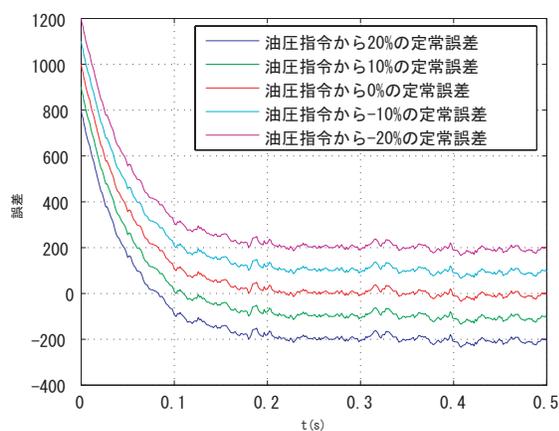


Fig. 3.11: 定常誤差に対する油圧ブレーキのみの場合の指令値からの誤差 Fig. 3.12: 定常誤差に対する車体のノミナルモデルを用いて油圧ブレーキを補償した場合の指令値からの誤差 (電気 + 油圧ブレーキ)

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。

3.3.3 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 (3.16) 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 (3.17) 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 [8]。

$$J = \int_0^{t_f} \left(\frac{da}{dt}\right)^2 dt \quad (3.16)$$

$$H = \frac{1}{2}u^2 + \lambda^T(Ax + Bu) \quad (3.17)$$

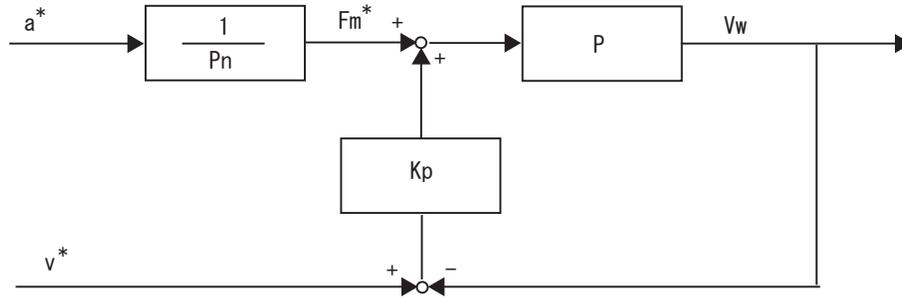


Fig. 3.13: 速度制御のブロック図

今回の速度制御のブロック図を Fig.3.13 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

$$P = \frac{1}{(M + M_\omega)s} \quad (3.18)$$

$$P_n = \frac{1}{(M_n + M_{\omega n})s} \quad (3.19)$$

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 [8]。

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 (3.20) と表される。

$$\frac{v}{v^*} = \frac{(M_n + M_{\omega n})s + K_p}{(M + M_\omega)s + K_p} \quad (3.20)$$

境界条件としては式 (3.21)(3.22) のようになる。

$$t = 0 : v = v_0, a = a_0 \quad (3.21)$$

$$t = t_f : v = v_f, a = a_f \quad (3.22)$$

まずは $10[m/s]$ で走っている状態から、加速度が始めとと終わりで $0[m/s^2]$ になるように $10[s]$ で速度を $0[m/s]$ にしようとするものを考える。つまり、

$$v_0 = 10[m/s], a_0 = a_f = 0[m/s^2], t_f = 10[s] \quad (3.23)$$

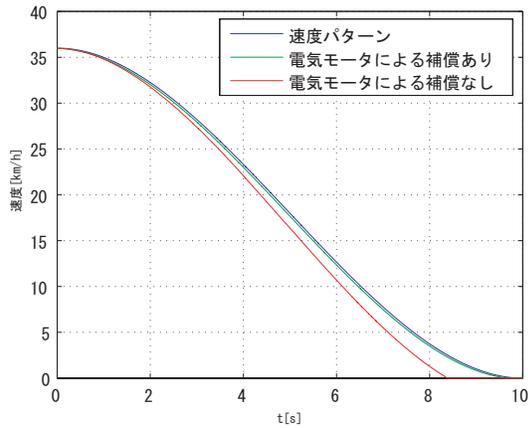


Fig. 3.14: 速度制御へ適用したときのシミュレーション結果 ($V_0=10[m/s]$)

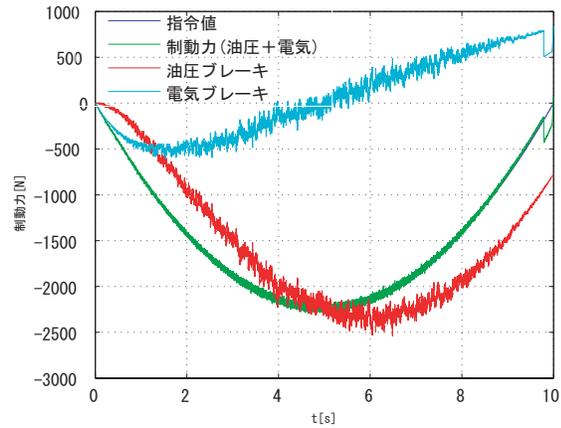


Fig. 3.15: 速度制御を適用したときの制動力の分担 ($V_0=10[m/s]$)

のときに作り出された速度パターンを Fig.3.13 の速度制御に適用した。

シミュレーション結果を Fig.3.14, Fig.3.15 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指令値から 10% の外乱を加えてある。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。

また電気ブレーキはブレーキとしてだけではなく、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。

しかしながら、この場合は出力する制動力の最高値が $F=-2000[N]$ となっており電気ブレーキだけでも実現できてしまう。そこで次は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。

ここでは初速・初加速度を大きく、時間を短く設定してやることにより実現してやる。境界条件としては、

$$v_0 = 15[m/s], a_0 = a_f = -1[m/s^2], t_f = 5[s] \quad (3.24)$$

としてやる。

Fig.3.16, Fig.3.17 にシミュレーションの結果を載せた。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。

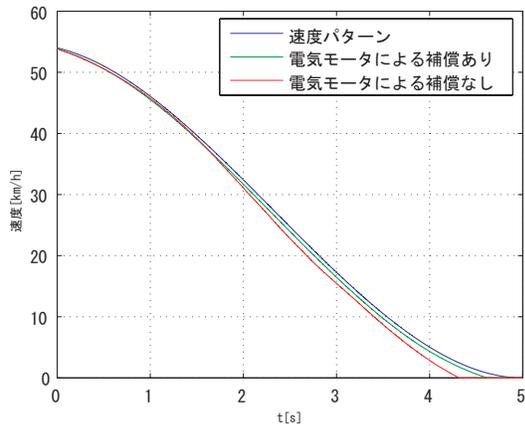


Fig. 3.16: 速度制御へ適用したときのシミュレーション結果 ($V_0=15[m/s]$)

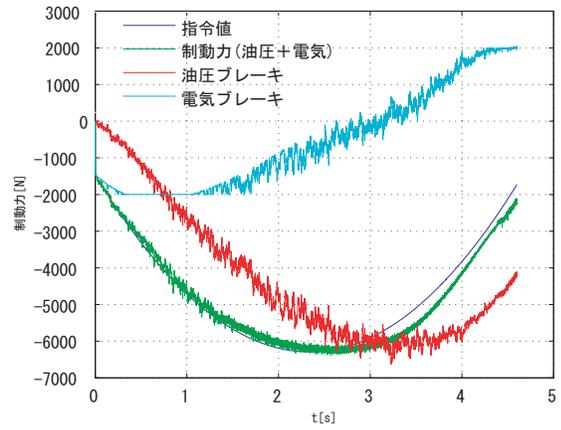


Fig. 3.17: 速度制御を適用したときの制動力の分担 ($V_0=15[m/s]$)

第4章 電気ブレーキによる補償を適用した電気自動車の制動実験

4.1 実験機”東大三月号 II”について



Fig. 4.1: 東大三月号 の外観

東大三月号 II とは本研究室が所有している実験用電気自動車である。その外観を Fig.4.1 に載せた。日産マーチ (平成9年式、EK11) をベースとした改造車で、その最大の特徴は4基のインホイールモータを使っていることである。このモータは永久磁石型の同期モータで、一般にブラシレスDCモータと呼ばれる。モータに加えて減速ギア (減速比5)、ドラムブレーキ、エンコーダなどが内蔵され、ユニット化されている。その定格表を表4.1に示す [9]。

4.2 ”東大三月号 II”による実験

4.2.1 実験手法

本研究室の所有する電気自動車の油圧ブレーキはペダル踏み込みによる指令値をとって行うことは可能であるが、実際に油圧アクチュエータを使って制御することができない。

表 4.1: 実験用電気自動車”東大三月号 II”のインホイールモータの定格表

モータ	ブラシレス DC モータ (8 極)
重量	25.3[kg]
定格出力	4[kW](1hour) / 36[kW](20sec.) 2.98[HP](1hour) / 28.3[HP](20sec.)
最高回転速度	8700[rpm] / 170[km/h]
最大トルク	77[N] at 4400[rpm] 1480[N] (駆動力換算値)
減速比	1/5(固定)

そのため、制動力指令値を油圧と電気ブレーキの両方に分担して制動させることはできないので Fig.3.1 の周波数分離や、Fig.3.5 の飽和の時の制動力の分担は実際に実験で実現することができない。

そこで実験では、制動力の指令値は油圧ブレーキだけにあたえらしたうえで Fig.3.7 で提案した油圧ブレーキの電気ブレーキによる補償を行うことにする。外乱オブザーバによって油圧ブレーキの油圧指令値からのずれを予測し、そのずれを電気ブレーキにフィードバックし補償することで、油圧ブレーキの指令値通りの制動を実現することを目標とする。

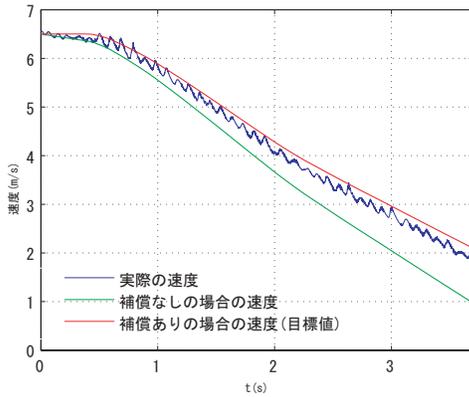
今回の実験は、アスファルトの路面で定常走行中に強めのブレーキをかけた。走行抵抗を考慮するために程度定常走行する区間を設けてある。パラメータとしては、センサ情報や微分による振動をとるための LPF の時定数 τ を変化させた。また、速度センサだけでなく加速度センサを用いた場合の実験も行った。

4.2.2 速度センサを用いた実験結果

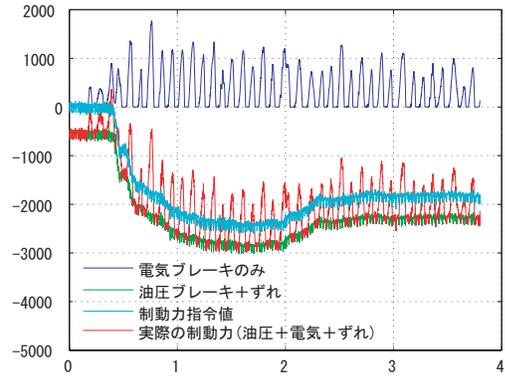
実験の結果を Fig.4.2 に載せた。ここで目標値とは、ブレーキペダルの踏み込みによる制動力指令値をそのまま車体の減速に実現した場合のものを載せている。また油圧ブレーキとずれによる制動力は測定することが不可能なので、速度変化から走行抵抗・ブレーキのモデルを予測して得られたシミュレーション結果である。

グラフを見ると時間遅れが小さいほど目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う。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ぶ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 を入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。

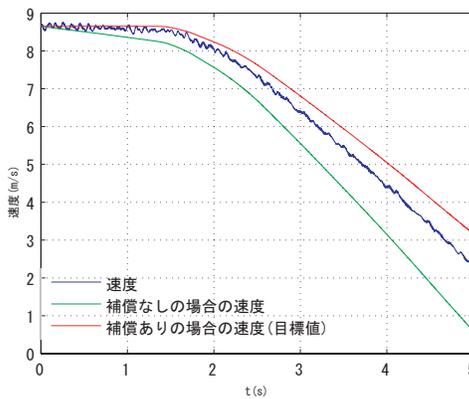
そこで次に微分をする必要がないよう加速度センサを用いて実験をすることにした。



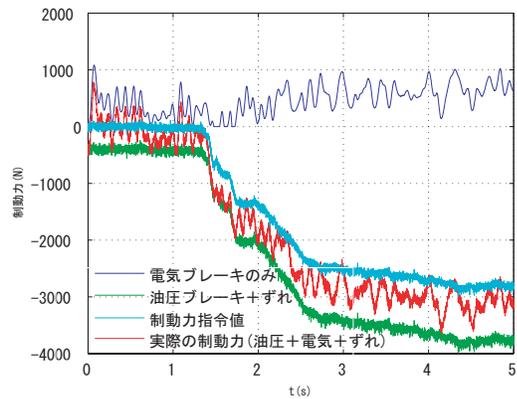
(a) $\tau = 0.1$ のみの時の速度



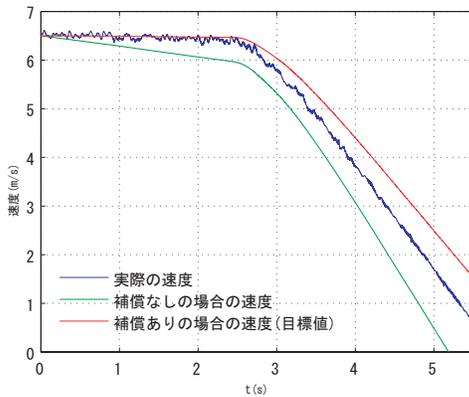
(b) $\tau = 0.1$ のみの時の制動力



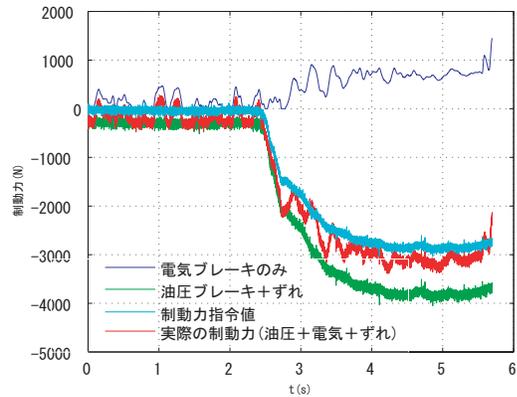
(c) $\tau = 0.1$ と $\tau = 0.05$ の時の速度



(d) $\tau = 0.1$ と $\tau = 0.05$ の時の制動力



(e) $\tau = 0.1$ と $\tau = 0.1$ の時の速度



(f) $\tau = 0.1$ と $\tau = 0.1$ の時の制動力

Fig. 4.2: 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 (LPF の時定数, 数を変化させた)

4.2.3 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.3.7 において $P_n = 1/(M + M_w)s$ としたが、加速度情報を用いる場合は $P_n = 1/(M + M_w)$ 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。

ただし加速度センサにはオフセットが存在しその情報が直接補償の制御に使われてしまうので影響が非常に大きい。そこで毎回止まった状態でオフセットを計算してから実験を行った。

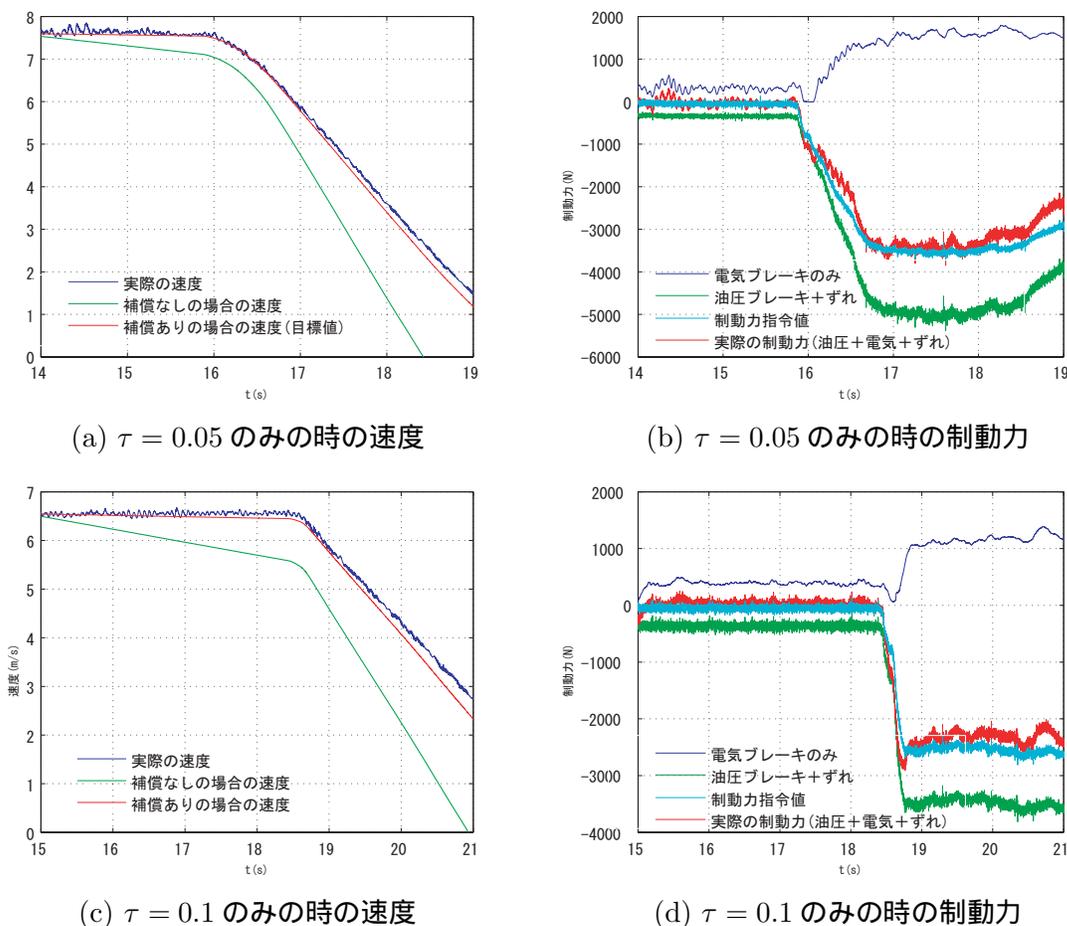


Fig. 4.3: 加速度センサを用いて電気モータによる補償を行ったときの実験結果 (LPF の時定数変化させた)

Fig.4.3 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。

問題点として、速度のずれが少しずつ増えてしまっていることがあげられる。グラフをみると定常走行しているときに速度がほぼ一定加速度で上がっているように見える。これはまさに加速度センサのオフセットのずれがそのまま影響している部分であり改善の必要がある。

第5章 結論

5.1 まとめ

本研究は、電気自動車において電気モータの高速かつ正確なトルク応答をいかすことで特徴の異なるブレーキである油圧ブレーキと電気ブレーキを協調させてブレーキ性能の向上をはかろうとしたものである。

3章において周波数分離を使うことで、制動力の指令を電気ブレーキは高周波域、油圧ブレーキは低周波域に分担し、車体モデルに適用させ応答性の向上することを示せた。このとき、電気モータの飽和について考慮した場合についても考えた。続いて、外乱オブザーバで油圧ブレーキの指令値からのずれを推定しフィードバックすることでそのずれを補償できることを示し、最適速度制御に適用するシミュレーションを行いその有効性について確認した。

また4章においては電気自動車の実験機”東大三月号 II”を用いることで、提案した手法である外乱オブザーバを用いた油圧ブレーキの電気ブレーキでの補償の実験を行った。速度センサを制御を行うことで油圧ブレーキの指令からのずれを電気ブレーキで補償した場合は、外乱を微分し予測するため振動が生じ大きな時間遅れのLPFを使うことが必要となり高速応答を実現することはできなかった。加速度センサを用いた場合は微分する必要がないため時間遅れが小さくてすみ、高速応答を実現することができた。

5.2 今後の課題

速度センサ・加速度センサ両方を用いた制御

速度センサを用いる場合はオフセットをとる必要がないため追従性については問題にならないが、微分する必要があるため振動を抑えるために時間遅れが大きくなり高速応答を実現することができなかった。

また加速度センサを用いる場合は微分をする必要がないため時間遅れを小さくできるので高速応答を実現することができた。しかしながら、加速度センサはオフセットのずれがそのまま加速度としてあらわれてしまうため追従性に問題があった。

そこで速度センサと加速度センサの両方を用いることで追従性・応答性両方が改善できるような制御系について考えてみたい。

油圧ブレーキを制御できる車両での実験

実験車両においては、油圧ブレーキを制御することができなかったため制動力の入力指令は油圧にしかいていないことになる。つまり今回は電気ブレーキへの制動力指令はなしで、電気モータは油圧の補償にしか使われていない。油圧ブレーキの補償は電気ブレー

キの応答性正確性を活かすことで実現されているが、補償するだけでは応答性のよさを活かしきれずるとはいいがたい。そこで、油圧ブレーキもある程度制御できるような車両を用いて協調的な制動を行いつつ補償ができるかどうか試してみたい。

謝辞

本論文を遂行するにあたり、指導教員である堀洋一教授にはご多忙でもあるにもかかわらず熱心なご指導をしていただき、研究を正しい方向に導いてくださったことに深く感謝いたします。先生には、研究面だけでなく工学者としての心構えを教えていただきました。

技術官の内田利之さんには、実験機”東大三月号”についての詳しい説明、実験での実現性の可能性についてなどの話をさせていただき大変勉強になりました。また、ガレージでの電気自動車のメンテナンス作業においては的確な指示を与えていただき助かりました。

研究員の畠直輝さん、呉世訓さんには研究室を牽引していただいただけでなく研究における助言やフォローをしていただきました。また、さりげなく研究室の雰囲気や和やかになるように気配りしていただいていたことに感謝いたします。

研究員の李練兵さん、李文さんは半年間という短い期間しか一緒にいられませんでした。研究の内容や故郷の話などを興味深い話を拝聴させていただきました。

博士課程の張炳勳さん、賀鵬さんには常に親しく接していただきいろいろな話をさせていただき大変参考になりました。

修士課程2年の青木良文さん、河島清貴さん、李微さん、呉魯さん、劉小星さんには研究内容に関する様々な相談にのっていただきました。研究に行き詰まり悩んでいるときには向こうから声をかけていただきとても助かりました。また、研究に対する姿勢は目を見張るものがあり研究者としての規範を示していただきました。

修士課程1年の吉田憲吾さん、中村則仁さん、趙莉さんには研究室での煩雑な仕事をさせていただき感謝しております。年齢も近いことがあり親しく接していただき研究生生活を楽しいものにさせていただきました。

秘書の越智さんには、いつも明るい笑顔で接していただき研究室で元気を与えていただきました。また研究生の耿聡さんにもいつも明るく接していただき感謝しております。

卒論生の中邨勉君、鈴木武海君、金間泰樹君には同じ卒論生として研究面、生活面とも何でも相談できる存在として大変お世話になりました。皆違う道を歩むこととなりますが苦楽を共にしたこの思い出はずっと忘れることはないでしょう。

最後になりましたが、お世話になった皆様の今後の益々の御発展と御活躍を祈願し謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] 長谷川 直之, "運輸部門における CO_2 対策", 自動車技術, Vol58, pp.8-13, 2004.
- [2] 田中 博久 他, "ブレーキにおける革新的な技術", 自動車技術, Vol59, pp.69-74, 2005.
- [3] 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.
- [4] 石原 智男, "油圧工学", 朝倉書店, 1968.
- [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] 松田俊郎, "ABS の最新実用知識", 自動車工学, vol.11, pp30-67, 1990.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 坂井 真一郎, "電気自動車の新しい車両運動制御に関する研究", 博士論文, 1999.

発表文献(予定)

学会、研究会等

- [1] 小池卓志, 堀洋一: ”電気モータの高速応答をを利用したブレーキ性能の向上”, IIC 研究会, 2006.3, Hamamatsu

国際会議論文

- [1] Takashi Koike, Yoshifumi Aoki, Xiaoxing Liu, Yoichi Hori, ”Advanced Vehicle Motion Control of EV based on Electric Motor’s Advantages”, *Proc. of EVS22*, 2006.10, Yokohama