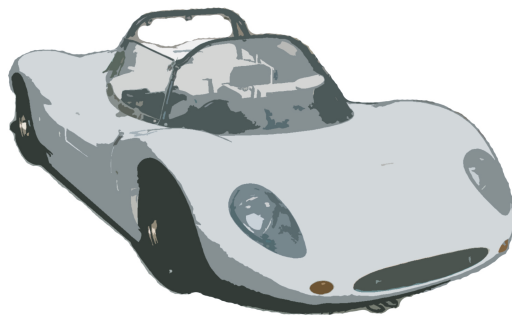


-修士論文-

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

**Skid Prevention for EVs based on the Emulation of Torque
Characteristics of Separately-wound DC Motor**



2005年1月28日

指導教員 堀 洋一 教授

東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻

36348 小玉 晋也

内容梗概

タイヤの空転や滑走を防止するには、長い時間スケールでは指令トルクを出力するが、車輪が小さなスリップを起こした時などのマイクロな時間スケールでは大きなトルク垂下を示すという、電圧駆動直流分巻モータのもつ特性が望ましい。

本論文は、永久磁石交流モータにおいてこの垂下特性を実現する手法、逆起電力オブザーバを用いた垂下特性の調整法などを提案し、「東大カドウェル号」の製作および実験によって提案手法の有効性を実証したものである。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	車両の1次元運動	5
2.1	車両の運動方程式	5
2.2	タイヤと路面間の増粘着特性	5
2.3	車両モデルの慣性項への近似	6
第3章	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	8
3.1	FB 電流制御（従来手法）の概要	8
3.2	FF 電流制御（提案手法）によるスリップ抑制の仕組み	8
3.3	シミュレーションによるFB 電流制御とFF 電流制御の比較	9
第4章	外乱オブザーバを用いたトルク（電流）垂下特性の調整	12
4.1	FF 電流制御 + 外乱オブザーバによるスリップ抑制	12
4.2	時定数 τ によるトルク（電流）垂下特性の調整	13
4.2.1	時定数 τ による調整効果	13
4.2.2	シミュレーションによる解析	13
4.3	ゲイン K によるトルク（電流）垂下特性の調整	15
4.3.1	ゲイン K による調整効果	15
4.3.2	シミュレーションによる解析	15
第5章	「MGセット」による基礎実験	18
5.1	実験装置「MGセット」の概要	18
5.2	FF 電流制御によるトルク（電流）垂下特性の確認	22
5.3	外乱オブザーバを用いたトルク（電流）垂下特性の調整	22
5.3.1	時定数 τ によるトルク（電流）垂下特性の調整	22
5.3.2	ゲイン K によるトルク（電流）垂下特性の調整	22
第6章	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	27
6.1	ブラシレスDCモータのベクトル制御の基礎	27
6.2	FB 電流制御（従来手法）の概要	29
6.3	ハイブリッド（FF+FB）電流制御（提案手法）によるスリップ抑制の仕組み	29
6.4	シミュレーションによるハイブリッド（FF+FB）電流制御の検討	31
第7章	「東大カドウェル号」の製作と実験	34
7.1	実験用電気自動車「東大カドウェル号」	34
7.2	乾燥路面での走行試験	38

7.3	1次元増粘着制御	42
7.3.1	濡れたアルミ板上の走行	42
7.3.2	低 μ 路の走行	43
7.3.3	ハードウェア的な問題点と今後の可能性	52
7.4	2次元増粘着制御	54
7.5	実験結果より	57
第8章	むすび	58
	謝辞	59
	参考文献	60
	研究業績	62
付録A	Making of “UOT CADWELL EV”	64
A.1	「東大カドウェル号」の製作年表	64
A.2	「東大カドウェル号」簡易操作マニュアル	69

第1章 はじめに

環境技術を制する者が 21 世紀の自動車技術を制する．このように表現しても過言ではない時代がやってきた．2005 年 2 月 16 日，1997 年に採択されて以来，長期にわたり効力を持たないでいた京都議定書がついに発行する．世界の CO_2 の 24 % (2000 年現在 [1]) を排出する米国が不参加を表明しているため，「本当に意味があるのか」という疑問の声も多々聞かれるが，昨年あたりから急激に増え始めている地球温暖化が原因とみられる世界中での異常気象による災害などを解決していくためには，必ずやり遂げなければならない．

歴史を遡ること 1873 年，イギリス人ロバート・ダビットソンが実用的な電気自動車を開発したときからその歴史が始まると言われている．当時は，内燃機関（ガソリン）自動車がまだ技術的に未熟であり，走行性能や扱いやすさにおいても電気自動車がむしろ喜ばれた時代であった．自動車レースでも 1899 年 4 月にフランスのアシュレスで，ジャメス・コンタクト号が時速 106km を記録し，内燃機関自動車を抑え花形の時代があった．その後，内燃機関自動車の急速な技術進歩により電気自動車の走行性能，利便性が失われ姿を消すこととなった．

日本においても，第二次大戦後のガソリン不足により電気自動車の生産が伸び，昭和 24 年には電気自動車普及台数が 3299 台となる．とは言っても，この数字は自動車全保有台数の 3 % 相当である．その後，内燃機関自動車の改良やガソリンスタンドの普及により電気自動車は衰退し昭和 30 年になると電気自動車は姿を消した．

時は 20 世紀末，自動車の排ガスによる都市環境問題， CO_2 による地球温暖化問題が社会問題として一段と大きく扱われるようになり，さらに追い討ちをかけるかのように，米国カリフォルニア州での ZEV 規制の制定によって，電気自動車が再び開発対象となり始めたのである [2, 3, 4, 5]．

ZEV 規制とは，次のようなものである [6]．

カリフォルニア州全域の大気汚染状況を改善するために定められた「カリフォルニア低排出車両法」の主要プログラムとして，カリフォルニア大気資源委員会（CARB）は 1990 年にゼロ排出ガス車（ZEV）プログラムを採択した．当初の ZEV プログラムでは，各自動車メーカーに対し，各社が販売する自動車のうち 1998 年初めの段階で 2 %，2003 年には 10 % をゼロ排出ガス車にすることが要求され，世界一厳しい規制として日本でも話題となり，対米輸出を行う日系自動車メーカー各社も対応を迫られることとなった．

ZEV プログラムでは，ゼロ排出ガス車としてはバッテリー式電気自動車を想定していたが，バッテリー式電気自動車は，走行距離（50～100 マイル）の短さ，高速道路走行には不十分な最高速度，狭い室内空間，充電時間の長さ（数時間），充電スタンドの不足，などの多数の問題によって期待したほどの市場性がなく，多くの自動車メーカーが反発したため，2001 年に同法の目標は下方修正された．具体的には，各社は販売車数のうち ZEV（運転時に全く排気ガスを出さないもの：燃料電池車が電気自動車のどちらかで，ハイブ

リッド車は含まず。)を2%，AT-PZEV（ゼロ・エミッション車として部分換算される先進技術搭載車：現在は市場に出していないが，将来的には天然ガスと電気のハイブリッド車等は当てはまる可能性があるもの。）を2%，PZEV（CARBが定めるSULEV基準（カリフォルニア州極超低排出車基準）と呼ばれる排ガス基準に適合するもの。）を6%という組み合わせでも目標を達成できるようになった。

しかし，CARBは同時にハイブリッド自動車の燃費向上を求める条件を含めようとしたため，GMとダイムラー・クライスラーは，この新たな燃費規制は不公平であるとして連邦裁判所にカリフォルニア州を提訴した。結果は，燃費基準を設定する権限は連邦政府のみが有するという判断が下され，燃費に関する規制は削除された。

そして時は流れ，2003年の時点で，ゼロ排出ガス車やハイブリッド車が，販売されている車の10%（約10万台）に達していないことが明らかとなった。そこで，CARBはZEVプログラムのさらなるルール変更を提案し，カリフォルニアの自動車に対する新たな基準の設定と，自動車メーカーに何千台ものバッテリー式電気自動車の販売を求めていた既存の規制の削除を決定した。その代わりに，CARBは自動車メーカーに対して，ガソリン・ハイブリッド自動車及び同基準に合致する極めてクリーンなガソリンエンジン自動車を増やしていくことを義務付けることになった。また，バッテリー式電気自動車ではなく燃料電池自動車によって，ゼロ排出ガス自動車の実現にも期待をつないでいる。

4月24日に新たに改正された2003年ZEV達成計画によれば，自動車メーカーは4%のAT-PZEVと6%のPZEVで要求を達成できる。電気自動車など，大気汚染のない自動車は義務ではなくなったが，同時に2008年に年間250台の燃料電池車を市場に出すことが義務づけられた。

多くの技術的な問題によって，1990年に予想され義務づけられたほどの数のゼロ・エミッション自動車がカリフォルニアの路上に登場することはなかったが，今回の規制変更は，良く言えば，最終的な目標であるカリフォルニアの大気汚染の改善に向けて現実的なアプローチを認めたものであるが，悪く言えば，関係各所からの圧力によって少しずつ骨抜きにされてしまったとも言えよう。

ただ，少なくとも自動車メーカー各社の環境技術に取り組む気運を高めたことは大きな功績である。

このようにZEV規制が変遷していく中で，1997年には，トヨタ自動車からハイブリッド車プリウスが世界に先駆けて発売され，内燃機関自動車と電気自動車のいいとこ取りの商品として，話題を呼んだ[7, 8, 9]。1999年には，短距離走行の使用に限定することで，販売価格を抑えた日産ハイパーミニやトヨタe-comといった二人乗りの超小型電気自動車が登場し，これまでなかった新しい発想で，都市内で自動車を共同利用するシステムの実証実験も開始された[10]。

2002年12月には，トヨタ自動車と本田技研工業が，限定された台数ではあるが，世界で初めて燃料電池車のリース販売を行ったのに続き，2003年12月にはダイムラー・クライスラーが，2004年3月には日産自動車も限定リース販売を開始するなど，燃料電池車の開発が世界規模で進み，日本においても実証試験が開始されている[11, 12]。

筆者は，2003年11月に米国カリフォルニア州ロングビーチで開催されたEVS20（The 20th Worldwide International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition）に参加し，燃料電池車FCHV（トヨタ自動車），FCX（本田技研工業）などに試乗する機会に恵まれたが，それぞれ自動車メーカーが市販を目指して製作しただけの

ことはあって、一般走行には申し分ない性能を体験すると同時に、シンポジウムにおいて、燃料電池車の開発状況や今後の課題などを学んだ。

このように、電気自動車（Electric Vehicle：EV）と一言で表現しても、蓄電池を電源とする純電池式（バッテリー式）電気自動車（Pure EV：PEV）、内燃機関とモータを併用するハイブリッド電気自動車（Hybrid EV：HEV）、燃料電池を電源とする燃料電池車（Fuel Cell EV：FCEV, FCV）などがあり、それぞれのシステムの構成なども考慮すれば、その単語の意味するものは多岐にわたる。

注目すべきは、その全てに電気モータが搭載されているという点である。電気モータが駆動源となっていれば、電気モータが持つ制御面での利点を十分に活かした技術について議論することが可能であり、その技術を全ての電気自動車に適用することができるのである。ゆえに、本稿での「電気自動車」とは、「電気モータを搭載した自動車」と定義する。

電気自動車には、

- トルク応答がエンジンより2桁速い

安定なフィードバック制御が可能になり、人間から見た駆動特性（目標値応答）を変えことなく、車輪がスリップしたときのトルクの垂下特性（外乱応答）だけを調節する（すなわち、増粘着制御を行う）ことが可能である。

- 発生トルクが正確に把握できる

タイヤから路面に伝わる駆動力や制動力を容易に推定でき、路面摩擦係数の実時間同定を容易に行える。つまり、ドライバーに対して、リアルタイムで路面の状態を知らせることが可能となる。

- モータを各輪に分散配置可能

4輪独立駆動にすることで、ヨーレートそのものを制御入力とする新しい制御系を組むことが可能であり、高度なモーション制御が可能になる。エンジンを4個用いることは、スペース的にもコスト的にも有り得ないが、電気モータなら可能である。

といった内燃機関にはない非常に優れた特徴があり、このような特徴を活かした電気自動車ならではの制御技術の研究も次第に拡大しつつあるが、一般に良いとされる燃費だけをアピールするのではなく、電気自動車だからこそ可能となる安全のための技術の研究していくことが重要であると考える。

例えば、慶応大学がこれまで開発してきた KAZ[13]の最高時速 311km/h を超える時速 400km/h を目指す新車両として、Elica を開発し、最高速度に挑戦する実験の様子が某テレビ番組で紹介された [14]。

また、国際会議や国内の研究会などでも、上述のモータの特徴を活かした研究を目にする機会が増え、我々の研究室においても電気自動車の増粘着制御や運動制御、路面状態推定、駆動力配分、電動パワーステアリングなどに関する研究に積極的に取り組んできた [15, 16, 17, 18]。

ごく最近では、市販車レベルにおいても、とりわけハイブリッド車は、トヨタ自動車のプリウス（新型）に代表される 35.5km/L という低燃費を誇る市販車も登場し、近年の原油価格高騰に伴い、そのグローバル規模での販売台数は伸びつつある [7, 8]。

また、近い将来の本命とされてきた燃料電池車は、水素の供給拠点整備やコストの問題から普及は相当先になると考えられるようになってきている。そのため、「ハイブリッ

ド車は燃料電池車までのつなぎの技術」として、これまで燃料電池車一本に開発を集中してきた一部の自動車メーカーからも、ハイブリッド車を販売していく方針発表や技術提携の動きなどが見られる。

燃費や排ガスの規制は厳しくなる一方で、多くの自動車メーカーがより即効性のある解決策を探しているのが実情であり、電気自動車における技術やそれに直結する技術の開発競争は急速に加速している。

ここまで、第1章では、電気自動車研究の歴史的背景や電気モータの特徴を活かした研究の必要性を述べてきた。

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）垂下特性に着目した新しいスリップ抑制制御について検討する。

まず、第2章では、車両の運動の最も基本となる1次元運動（前後方向のみを考慮した運動）について検討する。続く、第3章では、直流分巻モータを搭載した電気自動車において、トルク（電流）垂下特性を活かしたスリップ抑制手法を提案し、従来のFB電流制御手法を用いた場合との違いをシミュレーションによって比較検討する。第4章では、外乱オブザーバを用いることで上述のトルク（電流）垂下特性の垂下の大きさや速さを調整する方法を提案する。そして、第5章では、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、第3、4章で提案した手法の有効性を実験によって確認する。

次に、第6章では、現在の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モータを搭載した電気自動車において、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）垂下特性をまねることによって、スリップを抑制する手法を提案する。そして、第7章では、第6章で提案した手法を実現するために、ブラシレスDCモータを搭載した電気自動車「東大カドウェル号」を製作し、実験を行い、提案手法の有効性を検証する。

最後に、第8章では、本稿で提案したスリップ抑制手法や、その実験結果について総括を行い、今後の課題について述べる。

第2章 車両の1次元運動

本章では，車両の運動を考える際に，最も基本となる前後方向のみに基づいた1次元運動について検討する [19, 20] .

2.1 車両の運動方程式

モータの時定数は十分短く，転がり抵抗及び空気抵抗は十分小さいと仮定すると，車両に働く力は図 2.1 のようになり，車両の運動方程式は式 (2.1) – (2.3) で表現することができる .

$$\omega = \frac{1}{J_s}(T - rF_d) \quad (2.1)$$

$$V = \frac{1}{M_s}F_d \quad (2.2)$$

$$V_w = r\omega \quad (2.3)$$

式中の各変数は，減速後のモータの回転速度 ω ($=\omega_{rm}/\text{Gear Ratio}$)，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 である . 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 (2.1) 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している . 式 (2.2) は，車体の運動方程式である .

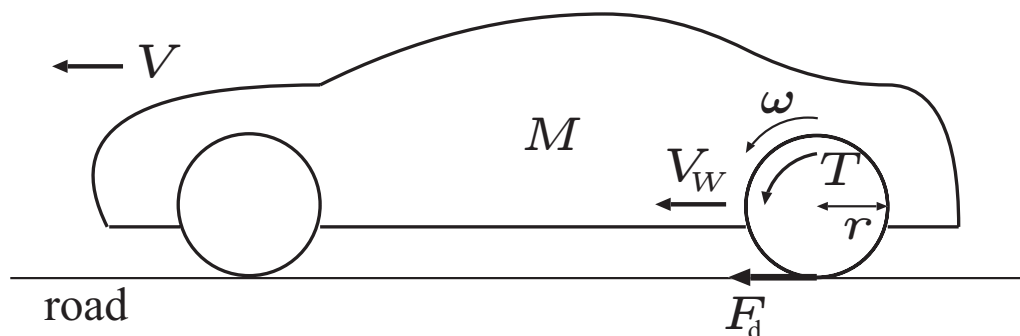


図 2.1: 車両の運動

2.2 タイヤと路面間の増粘着特性

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 (2.4) - (2.5) で定義される .

2.3. 車両モデルの慣性項への近似

$$\lambda = \frac{V_w - V}{V_w} \quad (\text{駆動時}) \quad (2.4)$$

$$\lambda = -\frac{V - V_w}{V} \quad (\text{制動時}) \quad (2.5)$$

スリップ率 λ を用いると、スリップ率とタイヤ-路面間の摩擦係数 μ との関係は、例えば $\mu - \lambda$ 曲線 (関数) と呼ばれる式 (2.6) で近似することができる。

$$\begin{aligned} \mu &= -1.05k\{\exp(-45\lambda) - \exp(-0.45\lambda)\} \quad (\text{駆動時}) \\ \mu &= 1.1k\{\exp(35\lambda) - \exp(0.35\lambda)\} \quad (\text{制動時}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで、 k は路面状態を表すパラメータであり、例えば式 (2.7) のように表現することができる、その時の $\mu - \lambda$ 曲線は図 2.2 のようになる。

$$\begin{aligned} k &= 1 \quad (\text{乾燥したアスファルト}) \\ k &= 0.2 \quad (\text{雪道}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

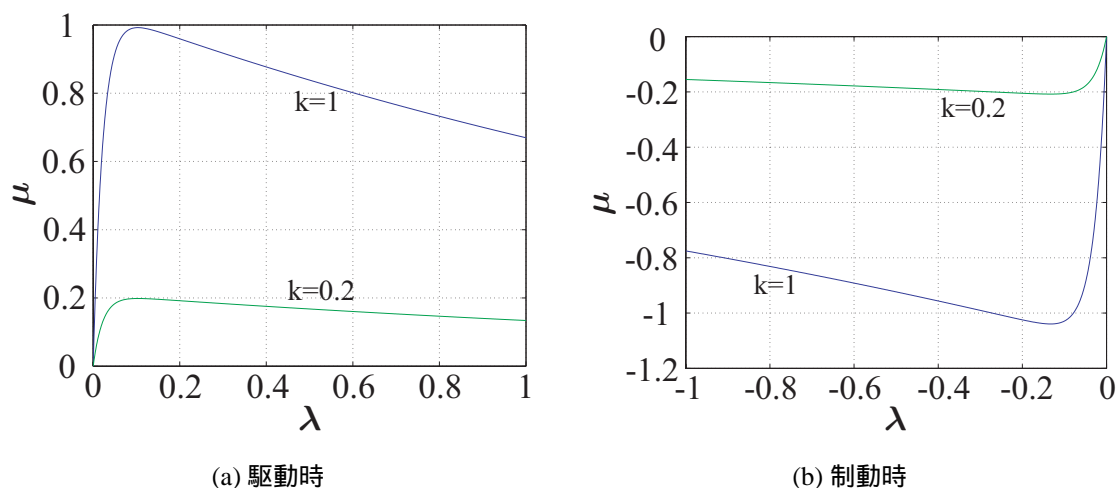


図 2.2: $\mu - \lambda$ 曲線の一例

スリップ率 λ と $\mu - \lambda$ 曲線によって決定する摩擦係数 μ を式 (2.8) に代入すれば、駆動力 F_d が求まる。

$$F_d = \mu(\lambda)N \quad (2.8)$$

ここで、 N はタイヤに働く垂直抗力である。以上より、車両の一輪モデルは図 2.3 となる。

2.3 車両モデルの慣性項への近似

式 (2.1) - (2.4) から式 (2.9) が得られる [15]。

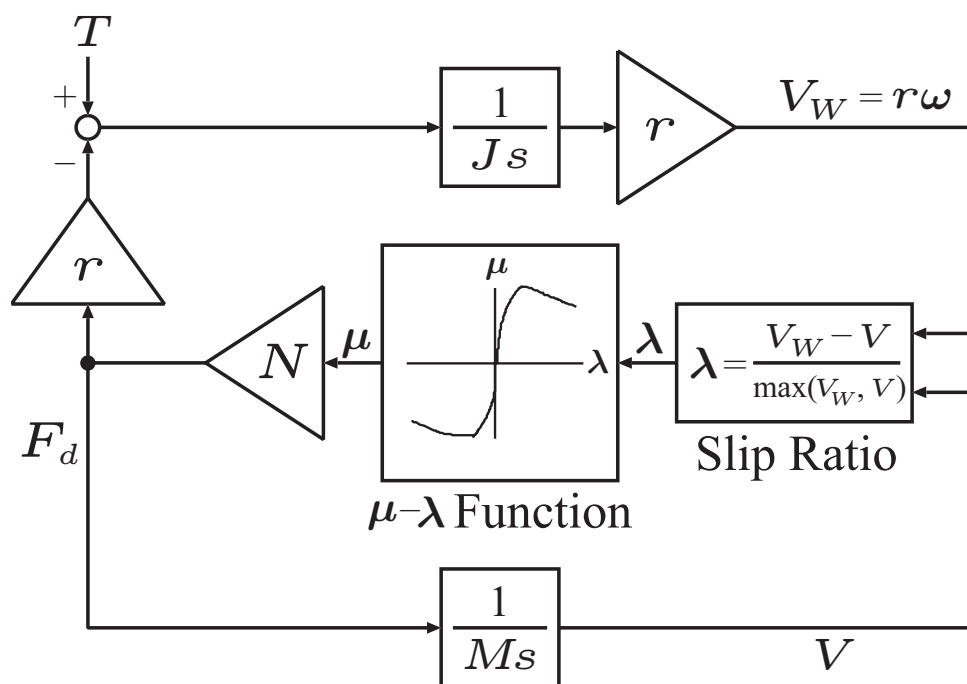


図 2.3: 車両の一輪モデル

$$\frac{\omega}{T} = \frac{1}{\{J + r^2 M(1 - \lambda)\}s} \quad (2.9)$$

式(2.9)の分母を J_s とみなすと、トルクとモータの回転速度の関係を簡単化することができ、図 2.4 のように表現することができる。

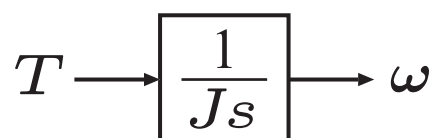


図 2.4: 車両モデルの慣性項への近似

走行中にスリップが発生すると、モータの回転速度と車体速度の差が大きくなるため、スリップ率 λ が上昇する。ゆえに、スリップは J が減少する現象であるとみなすことができる。

後に詳述することになるが、本稿におけるスリップ現象のシミュレーション及びハードウェアシミュレータ「MGセット」を用いた基礎実験においては、慣性モーメント J が $1/3$ に減少する現象を電気自動車におけるスリップの発生とみなすことにしている。

第3章 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

本章では，電気モータ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 [21] .

3.1 FB 電流制御（従来手法）の概要

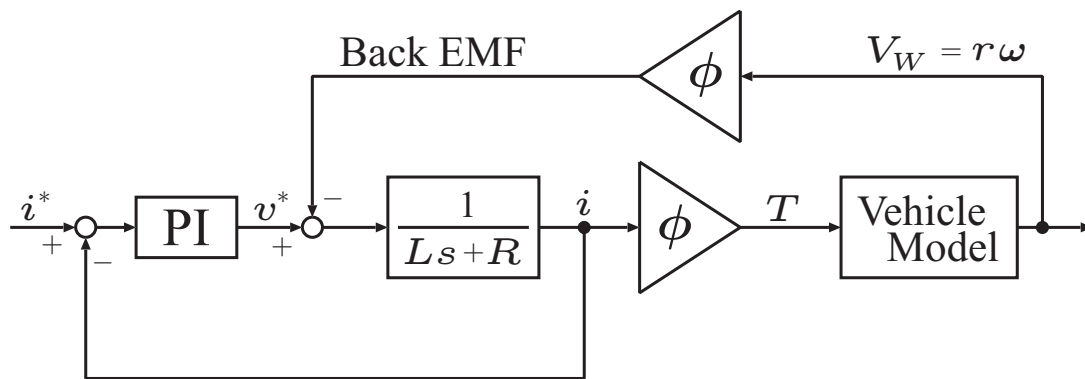


図 3.1: FB 電流制御（従来手法）による直流分巻モータを搭載した電気自動車のブロック図

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 3.1 のように表現することができる．同図 3.1 においては，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，FB 電流制御器が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．

3.2 FF 電流制御（提案手法）によるスリップ抑制の仕組み

図 3.2 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 3.2 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

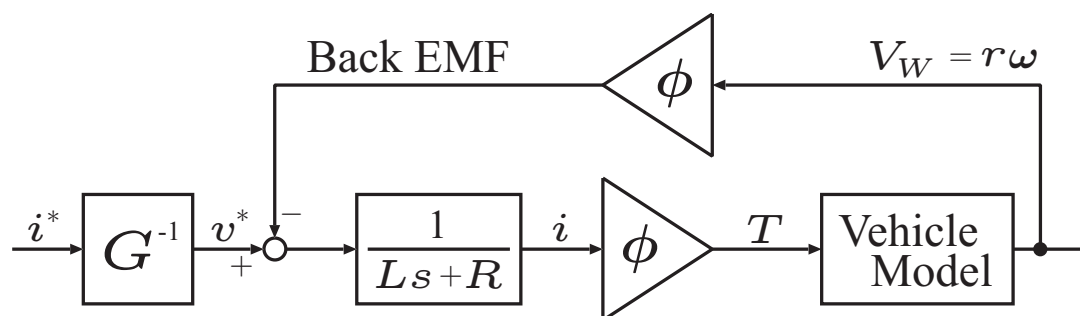


図 3.2: FF 電流制御（提案手法）による直流分巻モータを搭載した電気自動車のブロック図

のモータ電流は指令値を実現することができる。数式を用いた解析については、第 6 章で述べることにして、ここでは基本となる考え方のみを述べる。

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路面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。すなわち、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。

3.3 シミュレーションによるFB電流制御とFF電流制御の比較

図 3.1 及び図 3.2 に示した電気自動車のブロック図を用いて、計算機上でスリップ現象のシミュレーションを行う。計算条件は、実験開始時間を $t = 0[s]$ とし、 $t = 1[s]$ に滑りにくい路面（例えば、乾燥したアスファルト路面など）で一定トルク指令による加速を開始し、 $t = 6[s]$ でそのまま滑りやすい路面（例えば、雪道など）に進入するものとする。本シミュレーションの車両モデルのパラメータには、図 3.3 に示す我々の研究室の初代実験用電気自動車「東大三月号 I」のものを用いる。

シミュレーション結果を図 3.4 に示す。図中の“with FB current control”が FB 電流制御（従来手法），“with FF current control”が FF 電流制御（提案手法）を意味する。

図 3.4(a) の曲線を見ると、従来手法においては、スリップの発生前後で指令通りの一定トルクを維持しているのに対して、提案手法においては、スリップ発生時に大きなトルク（電流）垂下特性が現れている様子が確認できる。

3.3. シミュレーションによる FB 電流制御と FF 電流制御の比較



図 3.3: 実験用電気自動車「東大三月号 I」～駒場リサーチキャンパス堀研究室ガレージ前にて～

その結果，図 3.4(b) のように，従来手法においては，スリップ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，大きなトルク（電流）垂下特性により，モータの回転速度の急上昇が抑制されていることが分かる．

また，一定トルク指令で加速しているため，図 3.4(c) の車体速度は，従来手法及び提案手法の両者において同じとなり，図 3.4(d) に示すように提案手法においては，スリップ率の上昇も抑制され，タイヤの大空転が抑制されていることが確認できる．

以上より，計算機上のシミュレーションにおいては，提案手法である FF 電流制御を適用した場合に，スリップ発生時にモータの回転速度の急上昇を抑制することができることが確認できた．

3.3. シミュレーションによるFB 電流制御とFF 電流制御の比較

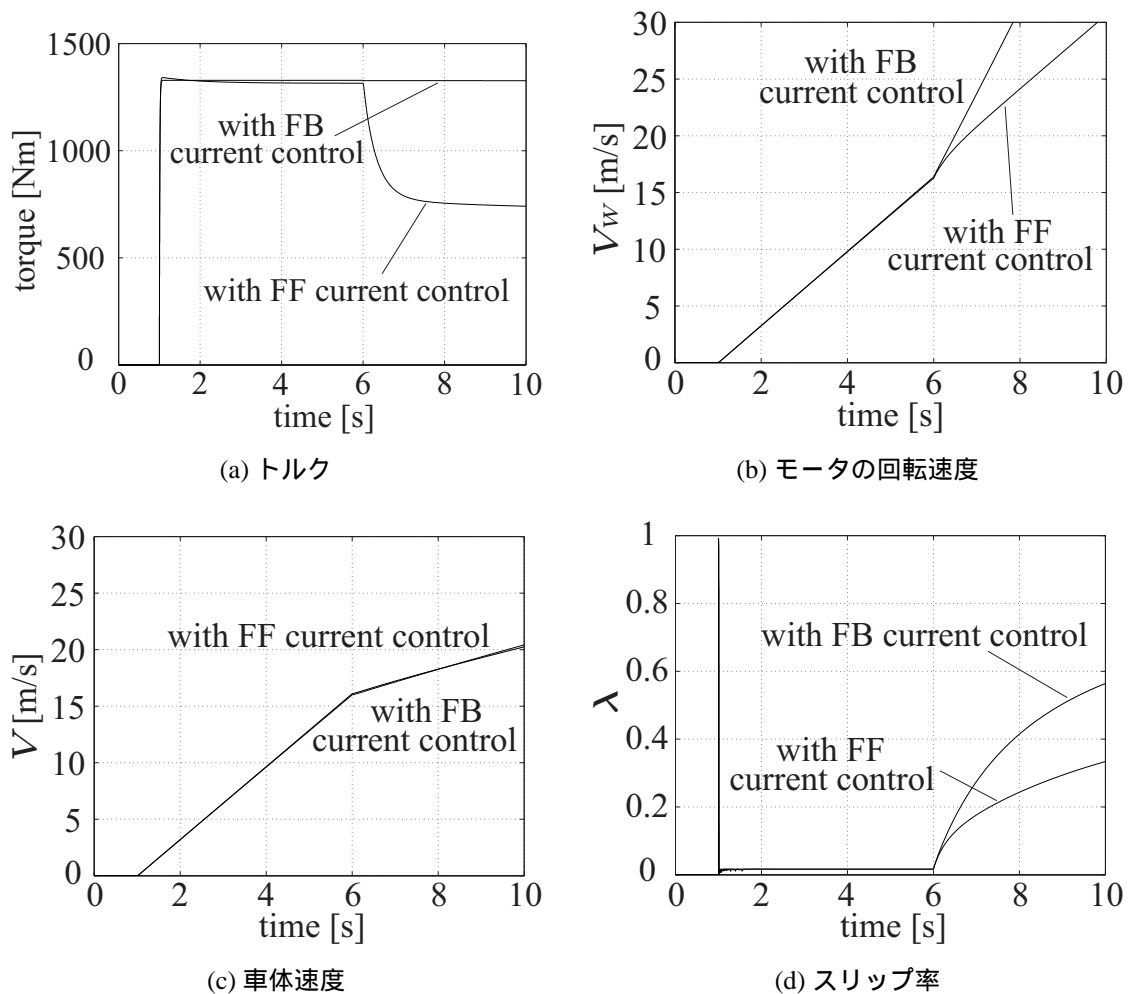


図 3.4: 東大三月号 I のパラメータを用いたスリップ現象のシミュレーション結果

第4章 外乱オブザーバを用いたトルク (電流) 垂下特性の調整

第3章では、FF 電流制御を用いることで直流分巻モータのトルク (電流) 垂下特性によって、スリップが抑制できることが分かった。本章では、このトルク (電流) 垂下特性の垂下の強さや速さの調整方法について検討する [22]。

4.1 FF 電流制御 + 外乱オブザーバによるスリップ抑制

トルク (電流) 垂下特性は、電気自動車の安全性や乗り心地などといったクルマとして最も重要な要因に影響を与える可能性があるため、垂下の強さや速さは自由に調整できることが望まれる。しかしながら、一般的にトルクの垂下の強さ (大きさ) は、モータのリアクタンス L などの物理定数によって決定するものである。そこで、電気自動車に一度搭載したモータを交換することなく垂下特性の効果を調整するために、外乱オブザーバを用いた手法を提案する。

直流分巻モータにおいて逆起電力を外乱とみなすと、第3章で提案した図3.2に外乱オブザーバを付加した様子は、図4.1となる。次節以降では、この外乱オブザーバの時定数 τ 及びゲイン K によるトルク (電流) 垂下特性の調整方法を検討する。

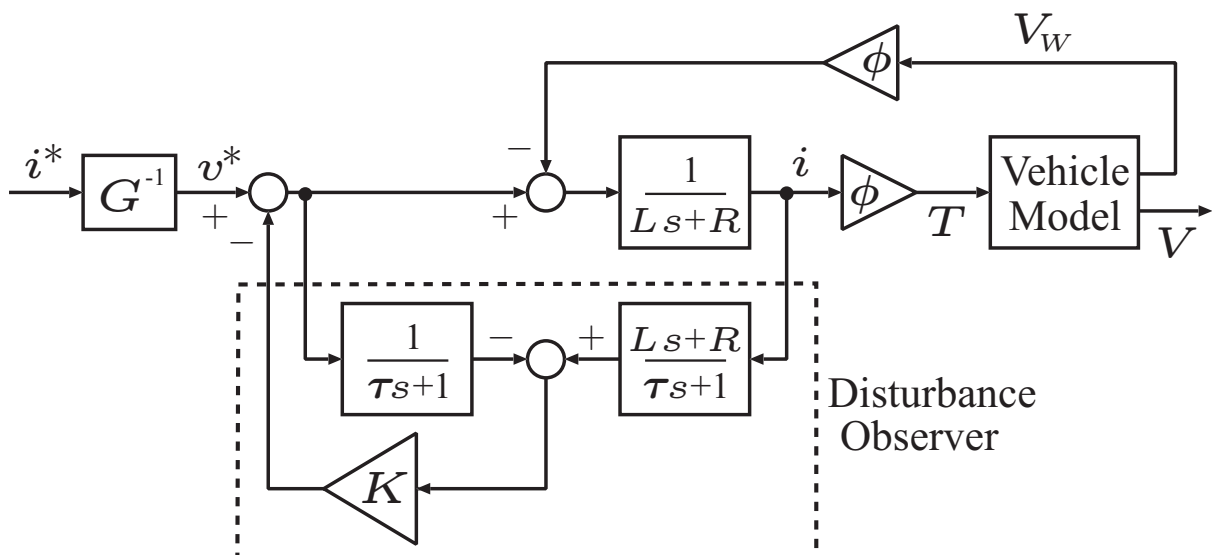


図 4.1: FF 電流制御による直流分巻モータを搭載した電気自動車のブロック図に外乱オブザーバを付加した様子

4.2 時定数 τ によるトルク（電流）垂下特性の調整

4.2.1 時定数 τ による調整効果

外乱オブザーバの時定数 τ が十分に小さい場合、逆起電力は完全に補償され、外乱はモータ電流に影響しない。反対に、時定数 τ が大きい場合、外乱抑圧応答は遅くなり、結果として外乱の影響がモータ電流に現れる。従って、時定数 τ を調整することによって、モータ電流における逆起電力の影響を調整することが可能となることが分かる。

4.2.2 シミュレーションによる解析

図 4.1 に示した電気自動車のブロック図を用いて、計算機上でスリップ現象のシミュレーションを行う。前項の考えに基づいて、補償ゲイン K を 1 とし、時定数 τ を 0.001 から 10 まで変化させるものとする。計算条件は、実験開始時間を $t = 0[s]$ とし、同時に滑りにくい路面で一定トルク指令による加速を開始し、 $t = 3[s]$ でそのまま滑りやすい路面に進入するものとする。本シミュレーションの車両モデルのパラメータには、後で詳述する「MG セット」のものを用いる。

シミュレーション結果を図 4.2 に示す。図 4.2(a) を見ると、時定数 τ がトルク（電流）垂下特性を変化させていることが分かる。時定数 τ が大きくなるほど、スリップ発生時の電流の垂下も大きくなっている。その結果、図 4.2(b) に示すようにモータの回転速度は急激な上昇を抑えられている。一方、時定数 τ が十分小さい場合、スリップ発生時に外乱である逆起電力は補償され、モータ電流は指令値と一致し、モータの回転速度は急激に上昇する。これはすなわち、FB 電流制御の場合と同じである。

次に、時定数 τ によるトルク（電流）垂下特性の変化について定量的に検討する。

図 4.1 における電圧指令 v^* から実際のモータ電流 i までの伝達関数は式 (4.1) で表現することができる。

$$G(s) (= \frac{i}{v^*}) = \frac{J\tau s^2 + Js}{JL\tau s^3 + J(L + R\tau)s^2 + (JR + \phi^2\tau)s + \phi^2(-K + 1)} \quad (4.1)$$

定常走行中は一定値である J を J_n とすると、 G^{-1} は式 (4.2) となる。

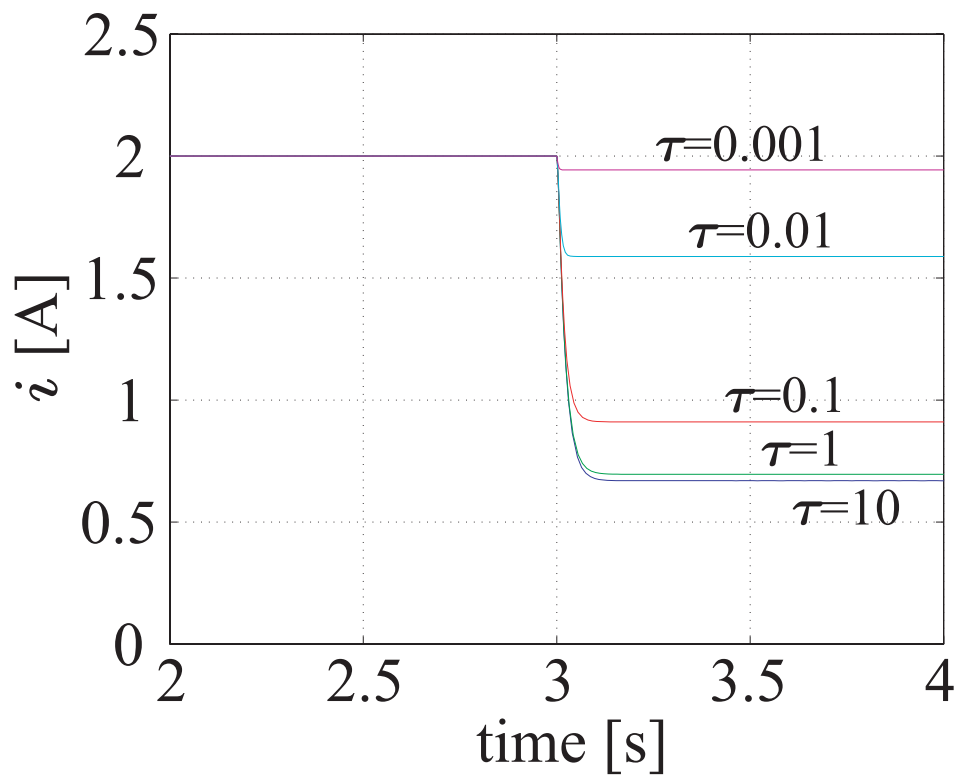
$$G^{-1}(s) = \frac{J_n L \tau s^3 + J_n (L + R\tau) s^2 + (J_n R + \phi^2 \tau) s + \phi^2 (-K + 1)}{J_n \tau s^2 + J_n s} \quad (4.2)$$

式 (4.1) 及び式 (4.2) を用いると、電流指令 i^* から実際のモータ電流 i までの伝達関数は式 (4.3) で表現することができる。

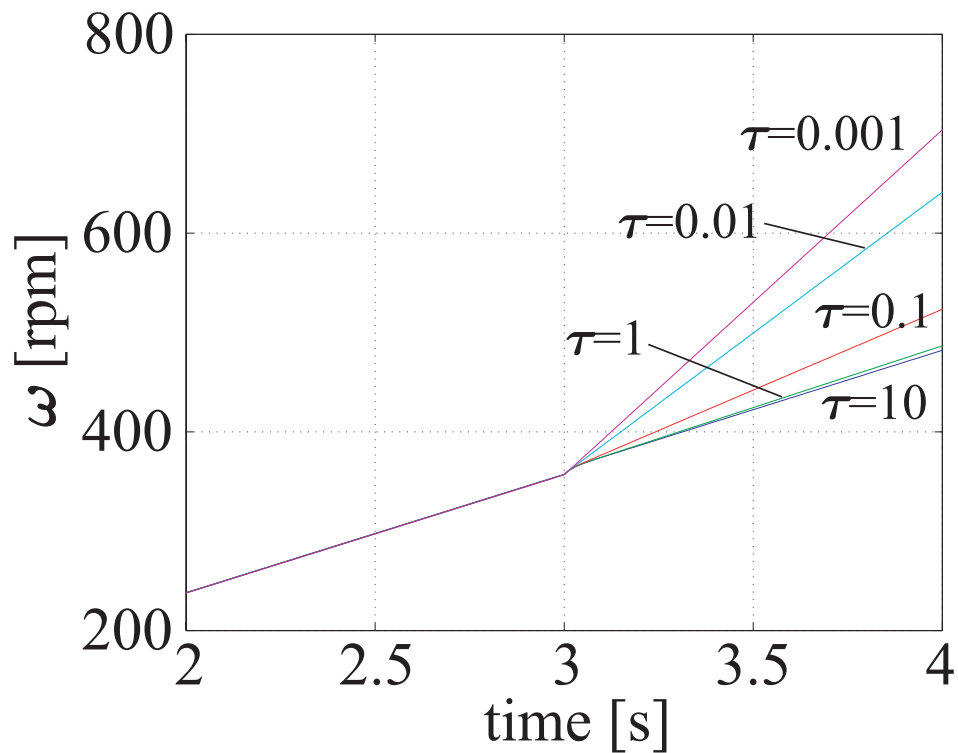
$$\frac{i(s)}{i^*(s)} = \frac{J_n L \tau s^3 + J_n (L + R\tau) s^2 + (J_n R + \phi^2 \tau) s + \phi^2 (-K + 1) J}{JL\tau s^3 + J(L + R\tau) s^2 + (JR + \phi^2 \tau) s + \phi^2 (-K + 1) J_n} \quad (4.3)$$

定常走行中は、 J と J_n が等しいため、式 (4.3) の値は 1 である。つまり、定常走行中は任意の電流指令がそのままモータ電流となって制駆動が行われるため、運転者は思い通りに車両の前後方向の運動を操ることができる。

次に、スリップ発生時の車両の挙動を解析する。車輪が空転している時のモータからみた車輪の慣性は、定常走行中よりも軽くなる。ゆえにここでは、スリップ現象を慣性



(a) 時定数 τ を調整した時のモータ電流



(b) 時定数 τ を調整した時のモータの回転速度

図 4.2: スリップ現象のシミュレーション結果：外乱オブザーバの時定数 τ によるトルク（電流）垂下特性の調整効果

4.3. ゲイン K によるトルク（電流）垂下特性の調整

モーメント J が急激に減少する現象ととらえて解析する．補償ゲイン K を 1 とすると，式 (4.3) におけるステップ応答の最終値は，式 (4.4) で表される最終値の定理より式 (4.5) となる．ここで， $r(t)$ はステップ入力を意味する．

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{i(t)}{i^*(t)} r(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{i(s)}{i^*(s)} \frac{1}{s} \quad (4.4)$$

$$= \frac{J_n R + \phi^2 \tau J}{JR + \phi^2 \tau J_n} \quad (4.5)$$

式 (4.5) をみると，電流指令 i^* から実際のモータ電流 i までの伝達関数の慣性モーメント J の変化は時定数 τ に依存していることが分かる．時定数 τ が十分小さいと式 (4.5) の値は常に 1 となり，電流指令がそのまま実際のモータ電流となるため，トルク（電流）垂下特性は現れない．反対に，時定数 τ が十分大きいと式 (4.5) の値は J/J_n となり，モータ電流は電流指令の J/J_n となる．この急激な電流の減少こそがトルク（電流）垂下特性と呼ばれる現象である．

以上より，時定数 τ によってスリップの発生時にトルク（電流）垂下特性は自由に調整できることが分かった．また，本手法の問題点として，トルク（電流）が垂下するには多少の時間がかかるということが挙げられる．つまり，たとえ時定数 τ が十分大きくとも図 4.2(b) のように，モータの回転速度が一旦急激に上昇してしまうのである．

4.3 ゲイン K によるトルク（電流）垂下特性の調整

4.3.1 ゲイン K による調整効果

提案手法では，トルクが垂下するまでに多少の時間がかかるという問題点を踏まえて，ゲイン K によるトルク（電流）垂下特性の調節について考察する．ゲインを $K = 1$ に固定した場合，式 (4.3) は 2 次遅れ系である．しかし，ゲインが $K \neq 1$ の場合，式 (4.3) は 3 次遅れ系となり，特性方程式は複雑になる．ラオスの安定判別法より， K が式 (4.6) を満たす時，特性方程式は安定である．

$$1 - \frac{(L + R\tau)(JR + \phi^2 \tau)}{L\tau\phi^2} < K < 1 \quad (4.6)$$

よって，ゲイン K が式 (4.6) を満たす時のみゲイン K を変化させることで式 (4.3) の応答時間を自由に調整することが可能となる．すなわち，ゲイン K を調整することによって応答時間の遅れを小さくすることが可能である．

4.3.2 シミュレーションによる解析

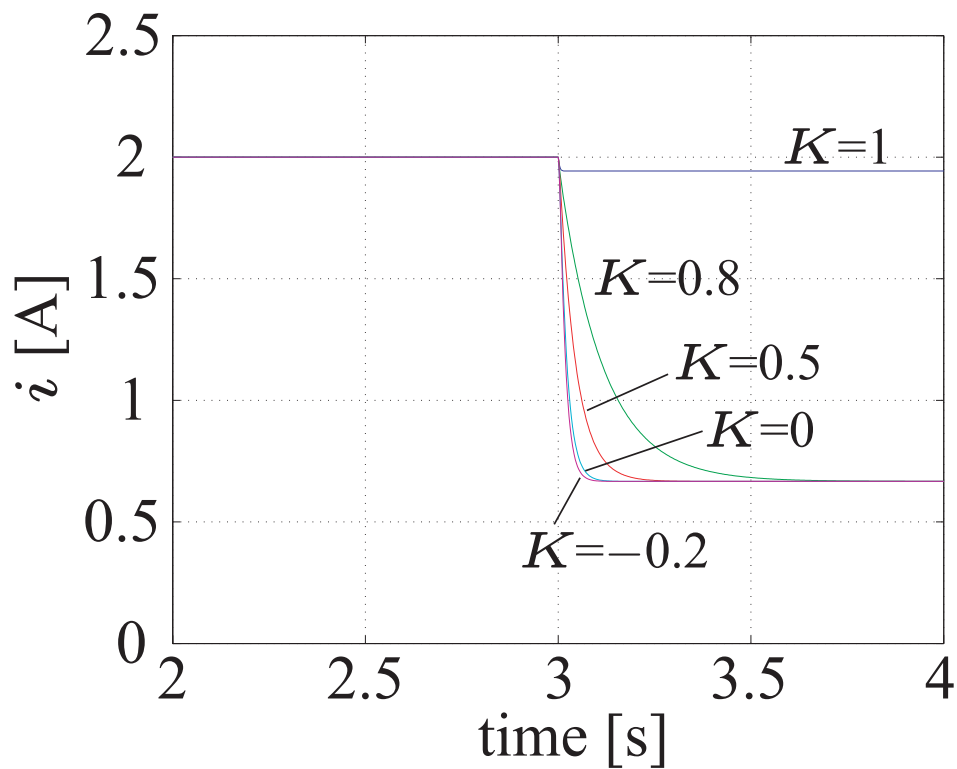
図 4.1 に示した電気自動車のブロック図を用いて，計算機上でスリップ現象のシミュレーションを行う．前項の考えに基づいて，時定数 τ を $\tau = 0.001$ として，ゲイン K を 1 から負の方向に大きくしていった時のトルク（電流）垂下特性の変化を観察する．計算条件は，実験開始時間を $t = 0[\text{s}]$ とし，同時に滑りにくい路面で一定トルク指令による加速

4.3. ゲイン K によるトルク（電流）垂下特性の調整

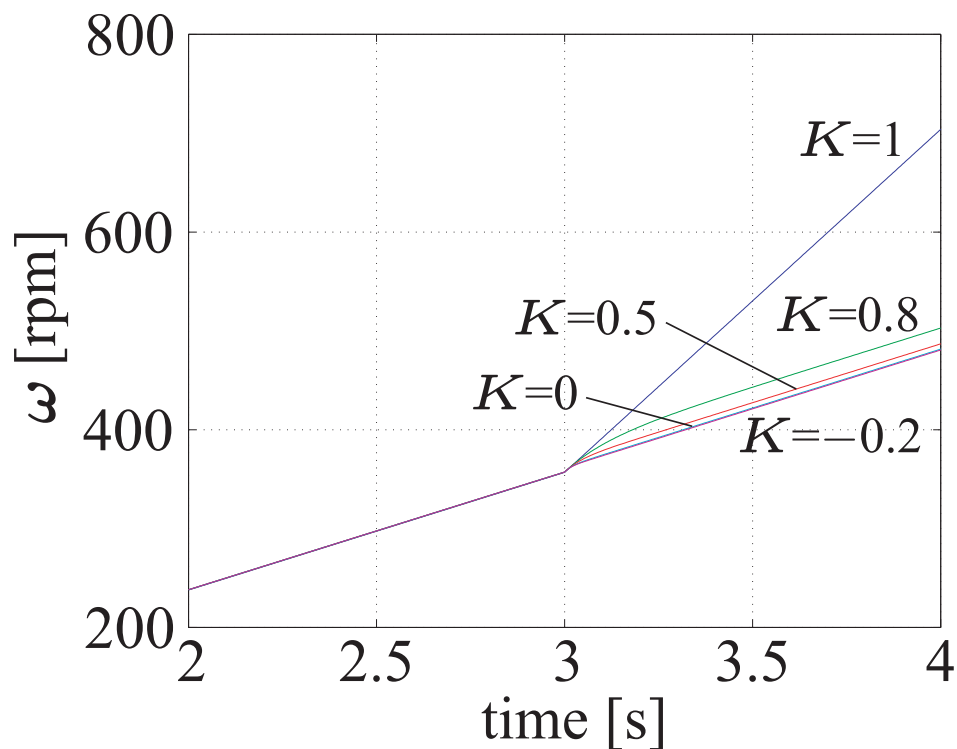
を開始し， $t = 3[s]$ でそのまま滑りやすい路面に進入するものとする．本シミュレーションの車両モデルのパラメータには，後で詳述する「MG セット」のものを用いる．

シミュレーション結果を図 4.3 に示す．図 4.3(a) より，ゲイン K を負の方向に大きくするにつれてスリップ発生時のトルク（電流）の垂下が速くなることが分かる．また，図 4.3(b) より， K が負の方向に大きいほどモータの回転速度は急激な上昇を抑えられている．

以上より，スリップ発生時のトルクの最終値は外乱オブザーバの時定数によって決定し，トルク（電流）の垂下の速さはゲインによって決定することが分かる．直流分巻モータの持つスリップ抑制機能を効果的に利用するためには，目的に合わせて時定数とゲインの最適な組み合わせを検討してトルク（電流）垂下特性を決める必要がある．



(a) ゲイン K を調整した時のモータ電流



(b) ゲイン K を調整した時のモータの回転速度

図 4.3: スリップ現象のシミュレーション結果：外乱オブザーバのゲイン K によるトルク（電流）垂下特性の調整効果

第5章 「MGセット」による基礎実験

本章では，第3章及び第4章において計算機上のシミュレーションで検討してきたスリップ抑制制御手法を，ハードウェアシミュレータ「MGセット」を製作し，実験を行い，その有効性を検証する．

5.1 実験装置「MGセット」の概要

図5.1にMGセットとその各部接続状況，また，図5.2に第3章で提案したFF電流制御によるスリップ抑制制御系の全体像，さらに，図5.3に第4章で提案したFF電流制御及び外乱オブザーバによるスリップ抑制制御系の全体像を示す．

MGセットは駆動側と負荷側の2つのモータのシャフトを連結させた実験装置であり，この装置を用いて，提案手法におけるスリップ発生時のトルク（電流）の垂下の様子と外乱オブザーバによってトルク（電流）垂下特性が調節される様子を観察する．

負荷側モータはハードウェアコントローラのみによって制御され，駆動側から見た負荷側モータの慣性モーメントを制御することができる．駆動側モータはハードウェアコントローラとソフトウェアコントローラからなり，PI制御器及びドライバなどはハードウェアコントローラ，外乱オブザーバ及び G^{-1} フィルタはソフトウェアコントローラで構成される．DA，AD，カウンタボードは両コントローラ間のやりとりをする．ソフトウェアコントローラのサンプリング時間は1[ms]であり，与える電流指令は $i^* = 2[\text{A}]$ ，車両のスリップを意味する慣性モーメントの急激な減少は $t = 3[\text{s}]$ 付近で生じるものとする．また，ソフトウェアコントローラはリアルタイムOS「ART-Linux」によって実現する．

表 5.1: MGセットのパラメータ

Rated output		0.4 [kW]
Rated voltage		60 [V]
Rated current		8.7 [A]
Rated speed		1200 [rpm]
Pole pair number		4
Resistance	R	1.4 [Ω]
Inductance	L	3.98 [mH]
Total inertia moment	J	5.88×10^{-3} [kg · m ²]
Torque coefficient	ϕ	0.35 [Nm/A]

5.1. 実験装置「MG セット」の概要

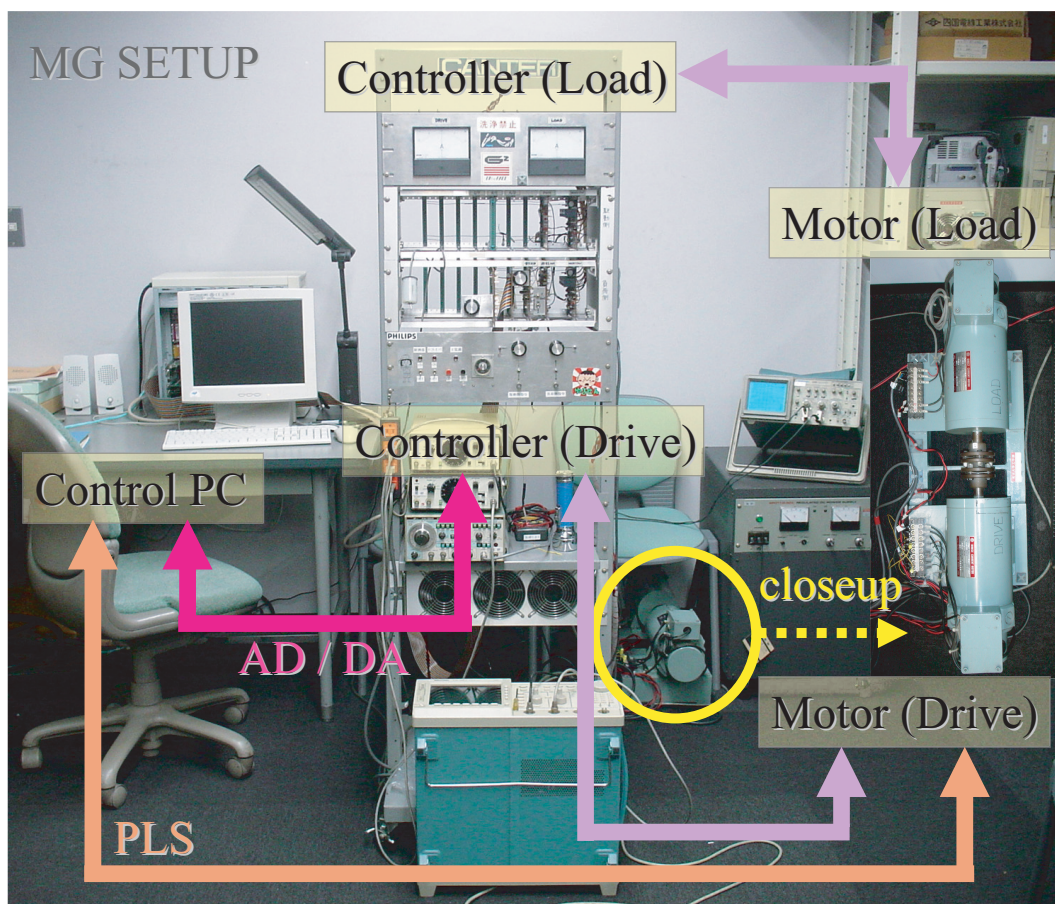


図 5.1: MG セットとその各部接続状況

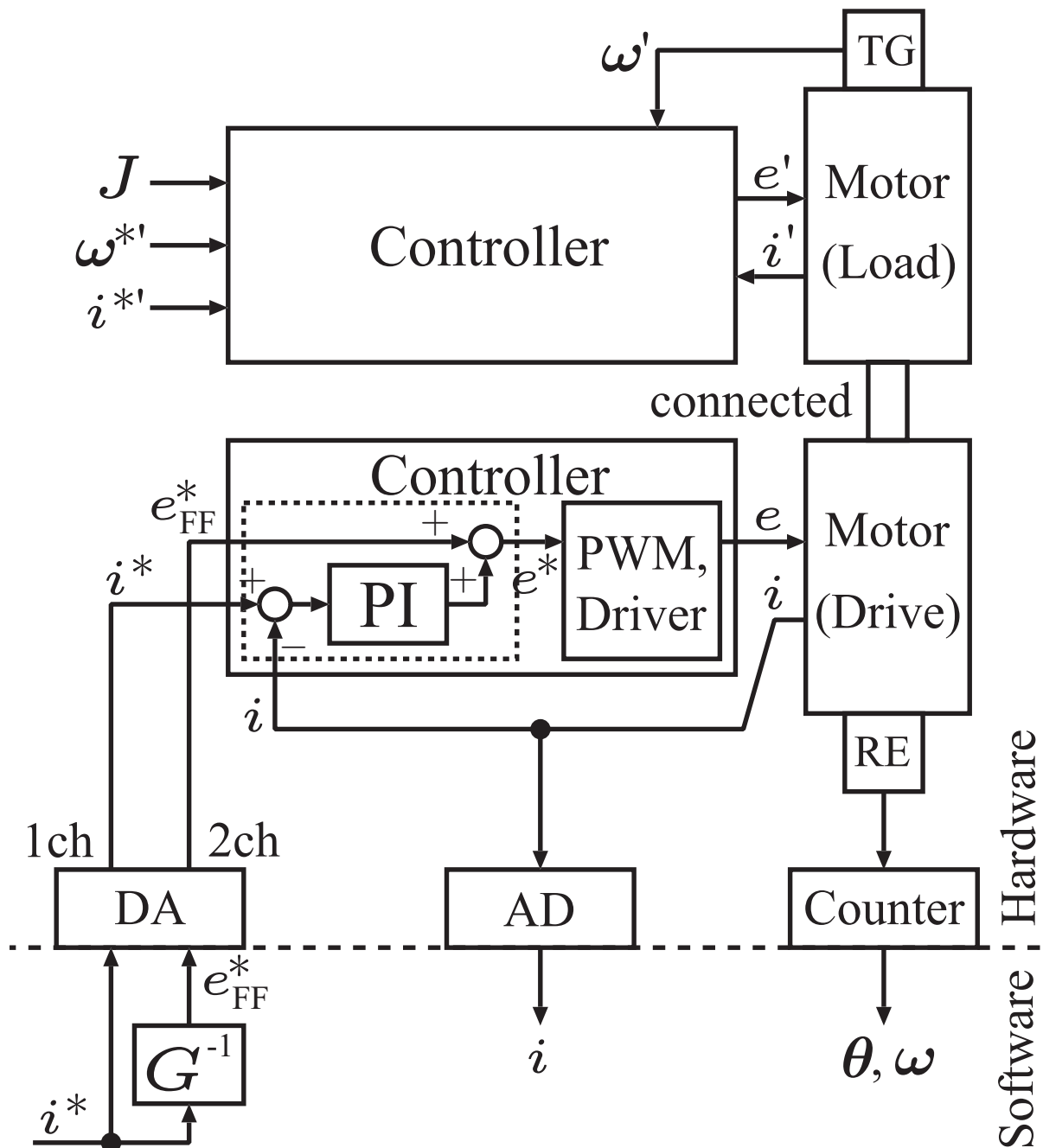


図 5.2: FF 電流制御を適用した MG セット制御系のブロック図

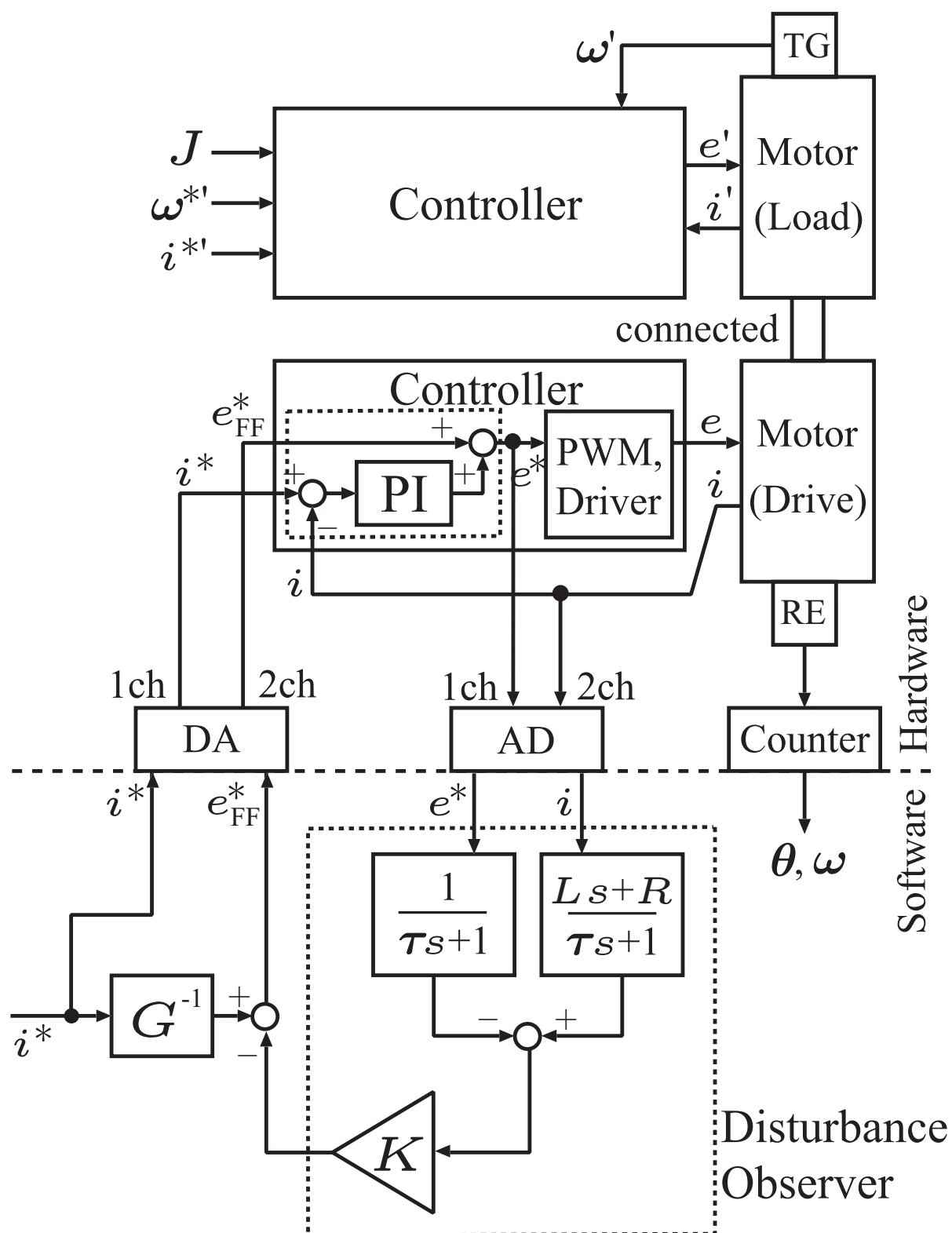


図 5.3: FF 電流制御及び外乱オブザーバを適用した MG セット制御系のブロック図

5.2 FF 電流制御によるトルク（電流）垂下特性の確認

第3章で示したFF電流制御によるスリップ抑制制御を用いて、トルク（電流）垂下特性を確認するための実験を行う。

実験条件は、実験開始時間を $t = 0[s]$ とし、同時に滑りにくい路面で一定トルク指令（実際には、一定電流指令 $i^* = 2[A]$ ）による加速を開始し、 $t = 3[s]$ でそのまま滑りやすい路面に進入する（実際には、慣性モーメント J を $1/3$ に減少させる）ものとする。

実験結果を図5.4に示す。図5.4(a)より、提案手法（FF電流制御）の場合、スリップ発生時にモータ電流が減少している様子が確認できる。これがトルク（電流）垂下特性であり、スリップ発生時の効果的なトルク（電流）垂下特性により図5.4(b)に示すようにモータの回転速度は急激な上昇を抑制されている。これに対して、従来手法（FB電流制御）の場合は、スリップ発生時にもモータ電流が一定に保たれるので、モータの回転速度は急激に上昇してしまっていることが分かる。

以上より、第3章で行った計算機上のシミュレーションと同様、MGセットを用いた実験においても、提案手法であるFF電流制御を適用した場合に、スリップ発生時にモータの回転速度の急上昇を抑制することができることが確認できた。

5.3 外乱オブザーバを用いたトルク（電流）垂下特性の調整

第4章で提案したFF電流制御及び外乱オブザーバによるスリップ抑制制御を用いてトルク（電流）垂下特性を調整する実験を行う。

実験条件は、前節と同様、実験開始時間を $t = 0[s]$ とし、同時に滑りにくい路面で一定トルク指令（実際には、一定電流指令 $i^* = 2[A]$ ）による加速を開始し、 $t = 3[s]$ でそのまま滑りやすい路面に進入する（実際には、慣性モーメント J を $1/3$ に減少させる）ものとする。

5.3.1 時定数 τ によるトルク（電流）垂下特性の調整

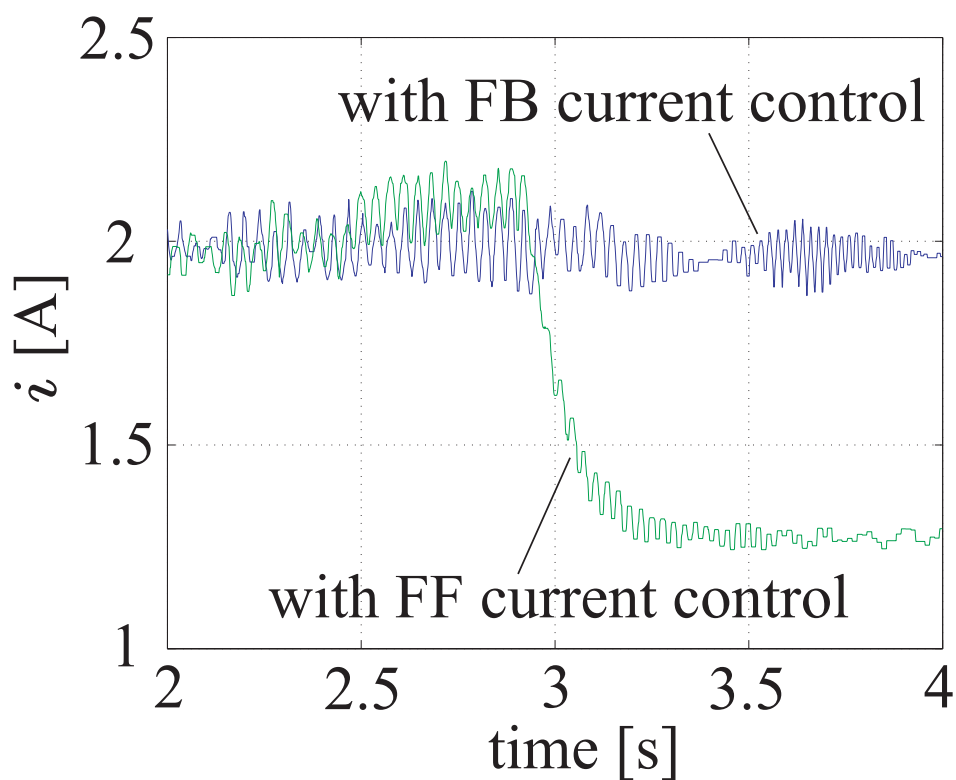
シミュレーションと同様、外乱オブザーバのゲインを $K = 1$ に固定して時定数 τ を 0.001 から 10 まで5通りに変化させた。

それぞれの実験結果を図5.5に示す。図5.5(a)より時定数 τ が大きいほど電流の垂下が大きくなっていることが分かる。その結果、図5.5(b)のように、モータの回転速度は急激な上昇を抑えられていることが確認できる。これらの実験結果はシミュレーション結果とほぼ一致している。

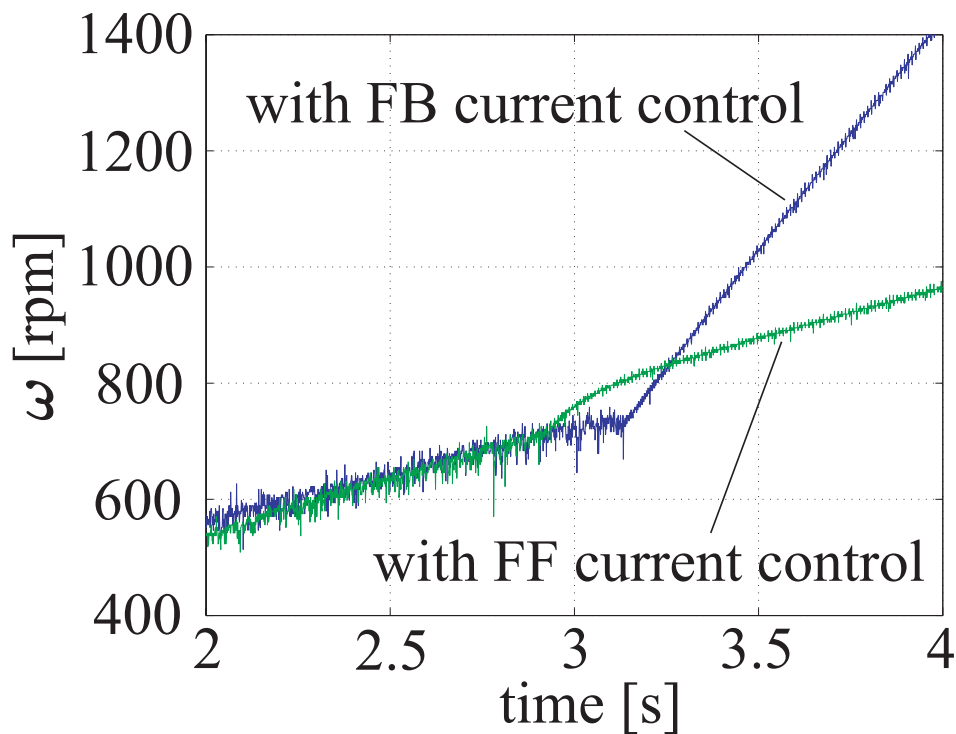
5.3.2 ゲイン K によるトルク（電流）垂下特性の調整

シミュレーションと同様、外乱オブザーバの時定数を $\tau = 0.001$ に固定してゲイン K を変化させた。

それぞれの実験結果を図5.6に示す。図5.6(a)よりゲイン K が負方向に大きいほどトルク（電流）は急激に減少していることが分かる。その結果、図5.6(b)のように、ゲイン

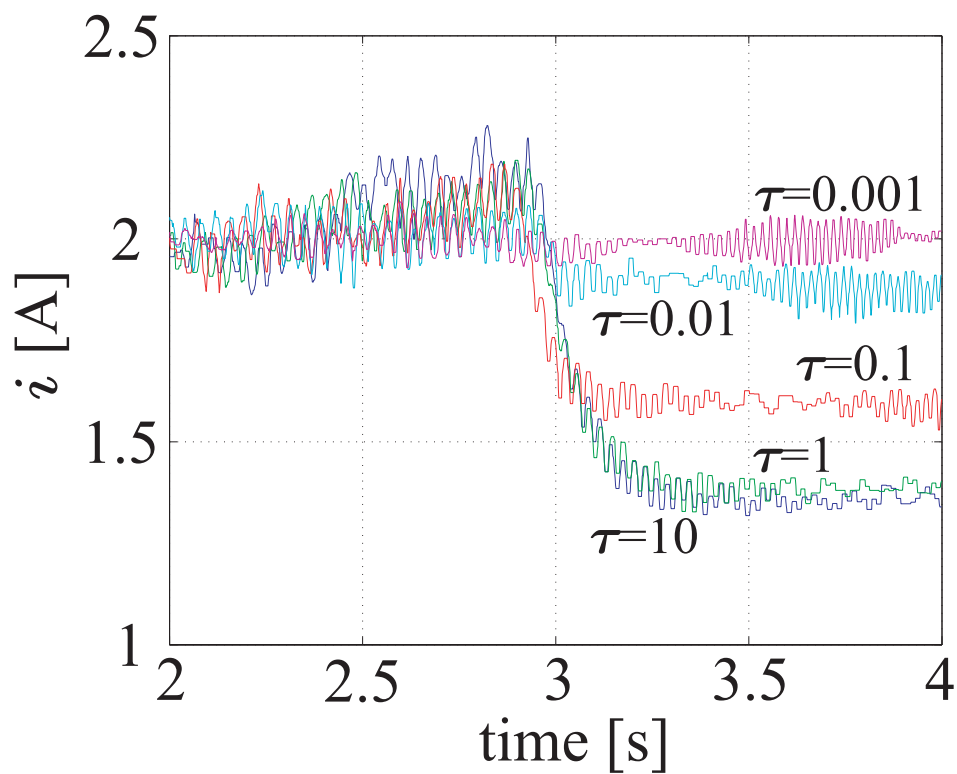


(a) モータ電流

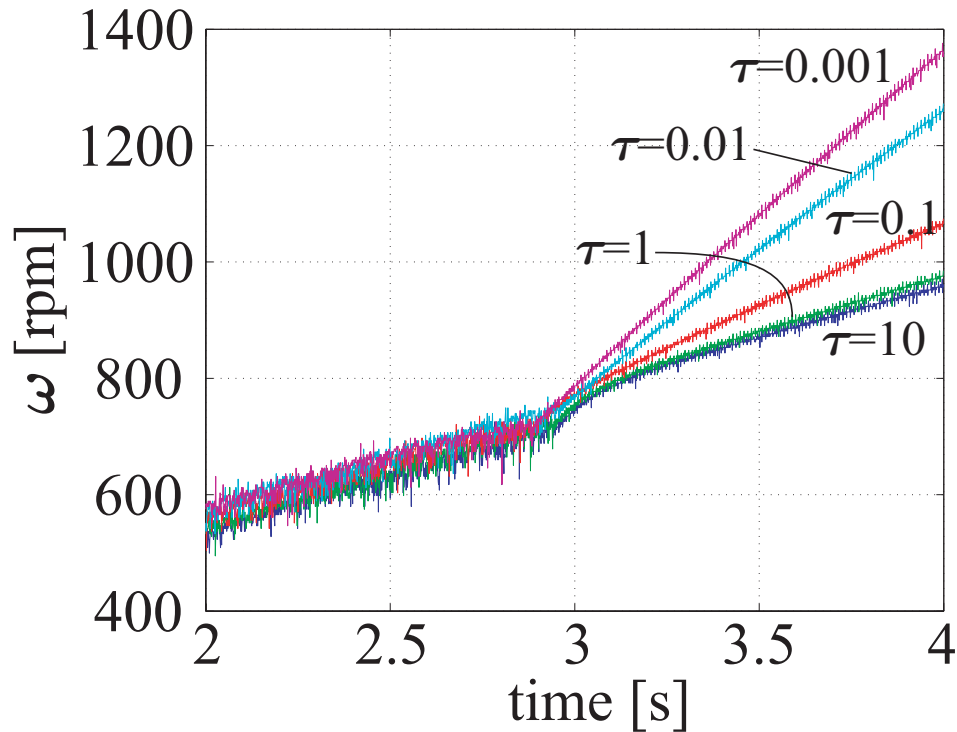


(b) モータの回転速度

図 5.4: MG セットを用いたスリップ抑制制御の実験結果：FF 電流制御によるトルク（電流）垂下特性の確認



(a) 時定数 τ を調整した時のモータ電流



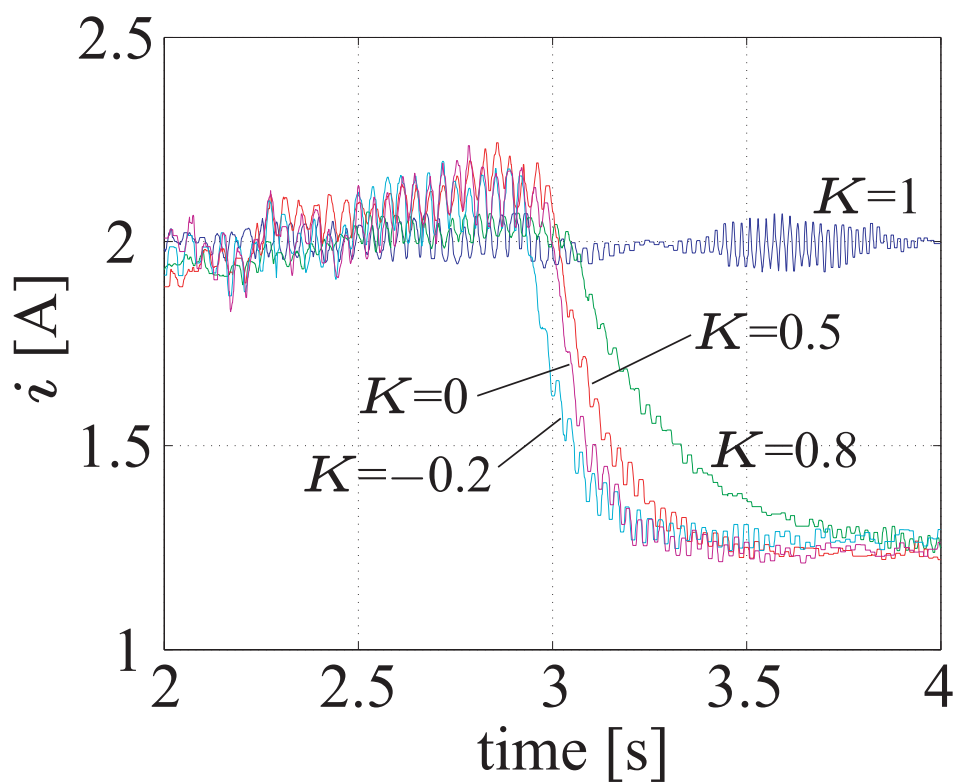
(b) 時定数 τ を調整した時のモータの回転速度

図 5.5: MG セットを用いたスリップ抑制制御の実験結果：外乱オブザーバの時定数 τ によるトルク（電流）垂下特性の調整効果

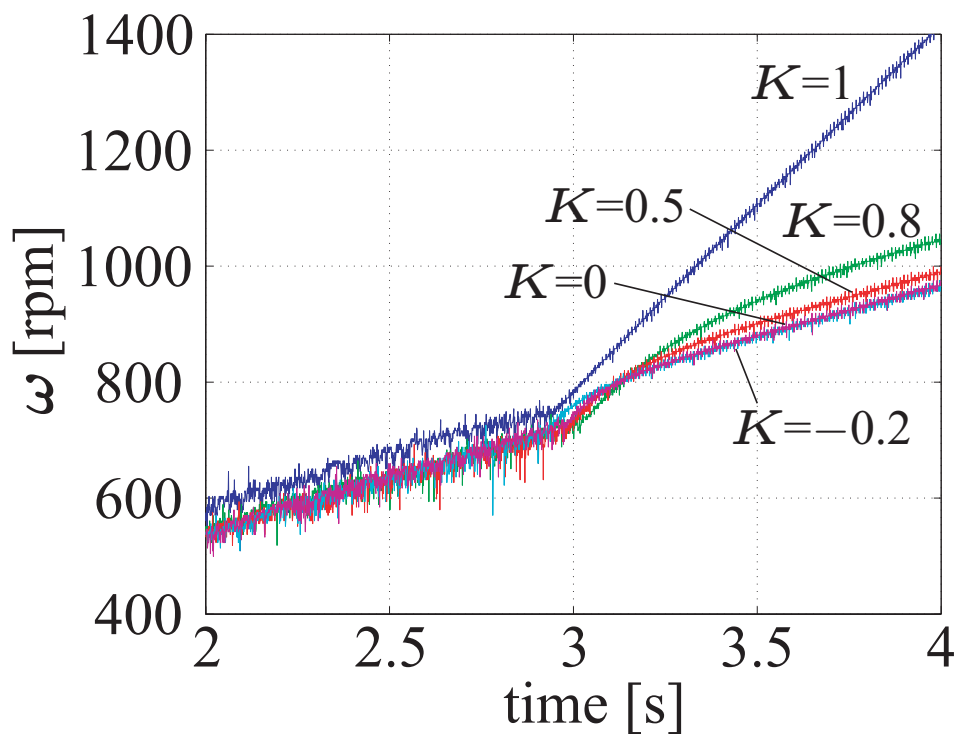
5.3. 外乱オブザーバを用いたトルク（電流）垂下特性の調整

が負方向に大きいほどスリップ発生時のモータの回転速度は急激な上昇を抑えられていることが確認できる．これらの実験結果はシミュレーション結果とほぼ一致している．

以上のハードウェアシミュレータ「MGセット」の実験結果から外乱オブザーバの時定数及びゲインを変化させることによって，直流分巻モータにおけるトルク（電流）垂下特性は自由に調整可能であることが確認できた．



(a) ゲイン K を調整した時のモータ電流



(b) ゲイン K を調整した時のモータの回転速度

図 5.6: MG セットを用いたスリップ抑制制御の実験結果：外乱オブザーバのゲイン K によるトルク（電流）垂下特性の調整効果

第6章 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モータを搭載した実際の電気自動車へ適用することを検討する．

6.1 ブラシレスDCモータのベクトル制御の基礎

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6.1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，

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_a + pL_d & -\omega_{re}L_q \\ \omega_{re}L_d & R_a + pL_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_{re}\phi_a \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

となる [23, 24, 25, 26] ．

表 6.1: 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

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		

本章で提案する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，従来手法と今回提案する手法を両方含んだ構成として，図6.1にブラシレスDCモータのベクトル制御全体構成を示す．

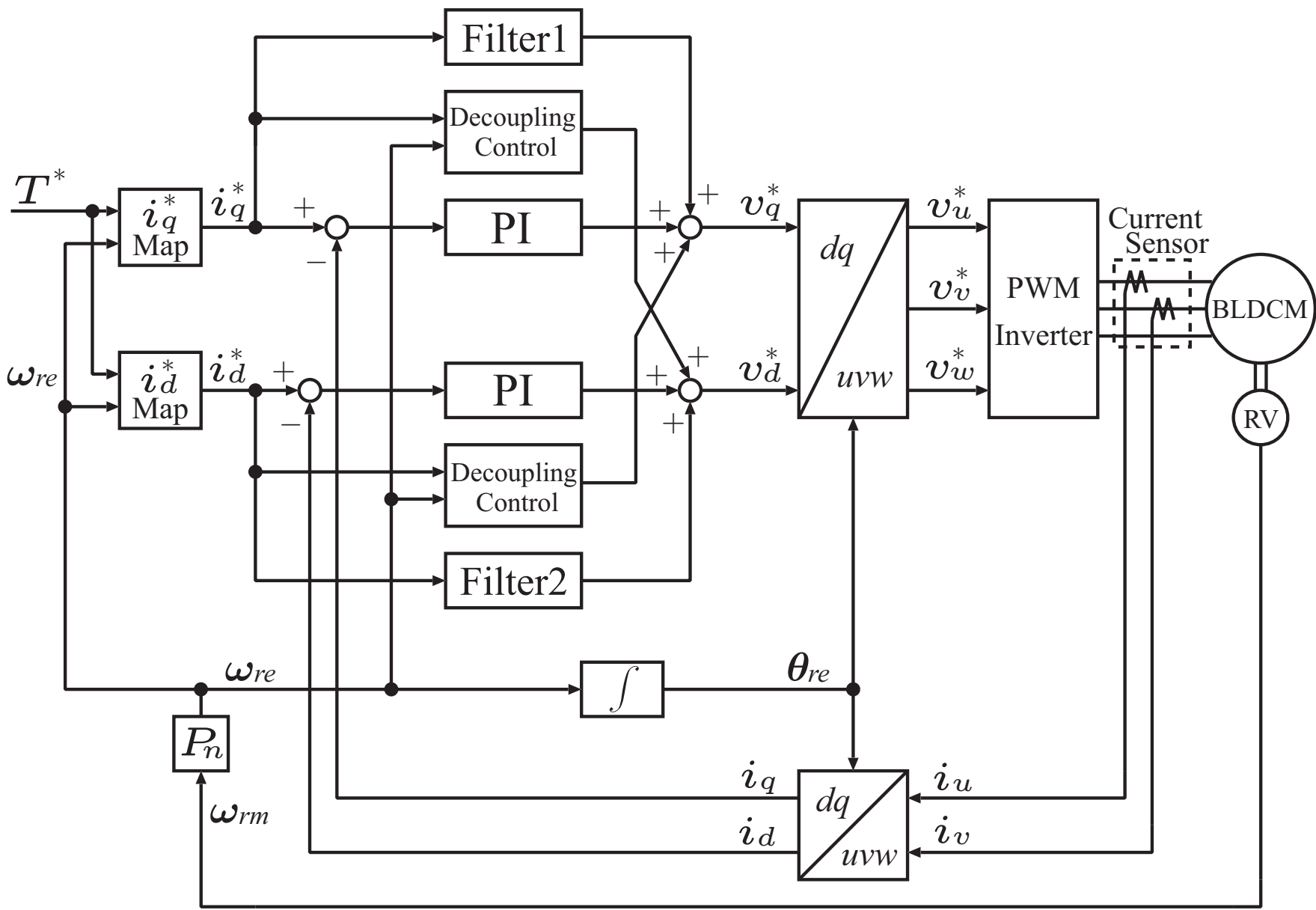


図 6.1: ブラシレスDCモータのベクトル制御全体構成

6.2 FB 電流制御（従来手法）の概要

従来のFB電流制御は、図6.1のベクトル制御dq軸ごとにそれぞれPI制御器で行う。このFB電流制御は、一般に最大トルク制御と弱め界磁制御を組み合わせたものであるが、実際の電気自動車用モータを考えた時、小型軽量化とともに低速域での高トルク運転や高速域での定出力運転が要求され、とりわけ電機子反作用の大きいIPMでは、磁氣的飽和の影響によるモータ定数の変化が大きくなる。また、モータ損失や高調波磁束の影響もトルク特性及び定出力運転範囲に影響を与えることになり、このような制御アルゴリズムに従った理想的な制御は難しいものとなる。

このため、最大トルク制御及び弱め界磁制御を行うために必要な電流データを実験的に、あるいは有限要素法などの磁界解析を用いて数値解析的に求め、トルク指令に対して最適な電流指令を出力するような電流指令マップ（テーブル）を作成する方法も提案されている。

本研究で製作する「東大カドウェル号」に搭載するブラシレスDCモータにおいても、図6.1に示すようにマップを用いている。この時のトルク特性の概念図を図6.2、電流特性の概念図を図6.3に示した[27, 28, 29]。

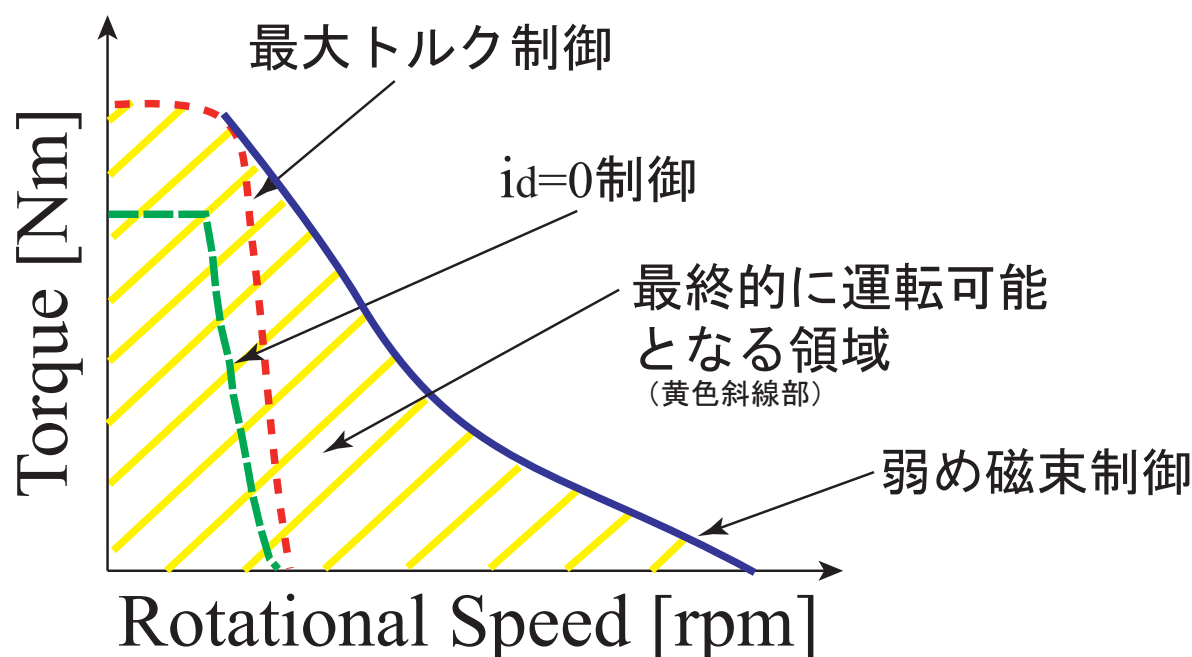


図 6.2: 各種制御法による速度-トルク特性

6.3 ハイブリッド（FF+FB）電流制御（提案手法）によるスリップ抑制の仕組み

本提案手法では、直流分巻モータの時と同様にFFフィルタを用いることによって、マイクロな時間スケールではスリップ発生時にトルク垂下特性を用いてスリップを抑制する。同時に、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

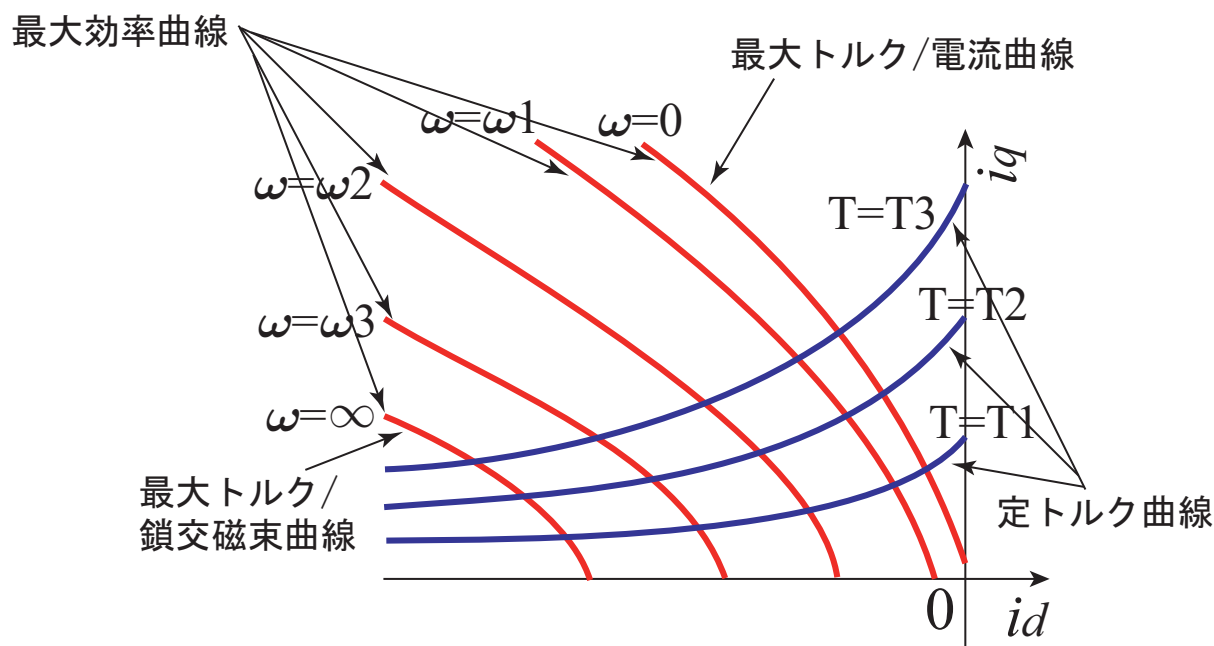


図 6.3: 最大効率を得る最適電流ベクトルの軌跡 (図中において , $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$, $T_1 < T_2 < T_3$ となる .)

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て外乱への応答性を遅らせた FB 電流制御手法とのハイブリッド電流制御となる．ここで，電流制御比例ゲインとは，図 6.1 における PI 制御器のものである．本ハイブリッド電流制御は，ベクトル制御においてトルク成分に関与する q 軸にのみ適用し，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．なお，簡単のためリラクタンストルクは無視する．

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図は図 6.4 で表現できる．同図 6.4 より， 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

$$\begin{aligned}
 G_q(s) &= \frac{i_q}{v_q^*} \\
 &= \frac{1}{L_q s + R_a + \frac{P_n^2 \phi_a^2}{J s}} \\
 &\approx \frac{J}{P_n^2 \phi_a^2 (1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s)} \\
 &\approx \frac{J}{P_n^2 \phi_a^2} \frac{s}{1 + \tau_m s}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

$$\begin{aligned}
 G_d(s) &= \frac{i_d}{v_d^*} \\
 &= \frac{1}{L_d s + R_a}
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

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

$$\tau_m = \frac{JR_a}{P_n^2 \phi_a^2} \quad (6.4)$$

$$\tau_e = \frac{L_q}{R_a} \quad (6.5)$$

となる．定常走行中は一定値となる J を J_n とすると， $G_q^{-1}(s)$ は，

$$\begin{aligned} G_q^{-1}(s) &= \frac{v_q^*}{i_q^*} \\ &= \frac{P_n^2 \phi_a^2}{J_n} \frac{1 + \tau_m s}{s} \\ &= \frac{P_n^2 \phi_a^2}{J_n} \frac{1}{s} + R_a \end{aligned} \quad (6.6)$$

となる．

式 (6.2)，(6.6) より，電流指令 i_q^* から実際のモータ電流 i_q までの伝達関数は，

$$\begin{aligned} \frac{i_q(s)}{i_q^*(s)} &= G_q(s) \cdot G_q^{-1}(s) \\ &= \frac{J}{J_n} \end{aligned} \quad (6.7)$$

となる．

定常走行中は J と J_n が等しいため，式 (6.7) の値は 1 である．つまり，任意の電流指令がそのままモータ電流となり制駆動が行われるため，ドライバーは思い通りに車両の前後方向の運動を操ることができる．

これに対して，スリップが発生した場合，モータからみた車輪の慣性は定常走行中よりも軽くなる．つまり， $J < J_n$ となり，式 (6.7) より，モータ電流は電流指令の J/J_n となる．この急激な電流の減少こそが，トルク垂下特性である．

よって，図 6.1 中のフィルタは，

$$F = \begin{pmatrix} \text{Filter1} \\ \text{Filter2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_q^{-1}(s) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

と表現できる．

6.4 シミュレーションによるハイブリッド (FF+FB) 電流制御の検討

図 6.1 及び図 6.4 に示した提案手法をベクトル制御の q 軸に着目して単純化したブロック図を図 6.5 に示した．

ハイブリッド (FF+FB) 電流制御 (提案手法) では，FF フィルタを用いるとともに，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 手法を組み合わせることによって制御するが，このうち FB 手法のゲインの下げ方について，図 6.5 をもとにシ

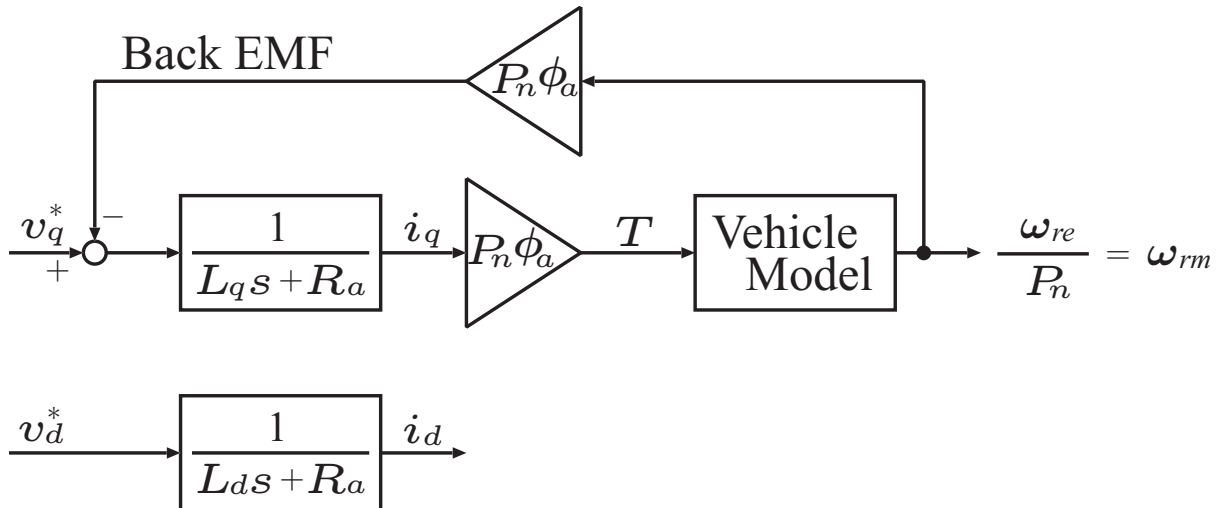


図 6.4: 非干渉化制御されたブラシレス DC モータを搭載した電気自動車のブロック線図

シミュレーションによって検討する．シミュレーションにおいて，電流指令 $i^* = 2[\text{A}]$ とし， $t=3[\text{s}]$ でスリップが発生するものとする．

図 6.6 に示したシミュレーション結果より，増粘着特性としては，FB 電流制御（従来手法）が最も悪く，ゲイン K を 20 から順に下げていくと，0 の時に最も良くなった． $K = 0$ というのは，直流分巻モータの時の FF 電流制御のみを用いている場合と同じである．このように，ゲインを下げていくに従って，トルク垂下特性の垂下の大きさが大きくなり，第 4 章において外乱オブザーバの時定数 τ を調整することによって実現できた垂下の大きさの調整と同様にスリップ抑制に有効であることが分かる．

ただし，これは単純化したモデルを用いているために言えることであり，次章において実験に基づく考察をする際には，必ずしもゲインを下げればよいというものではない．

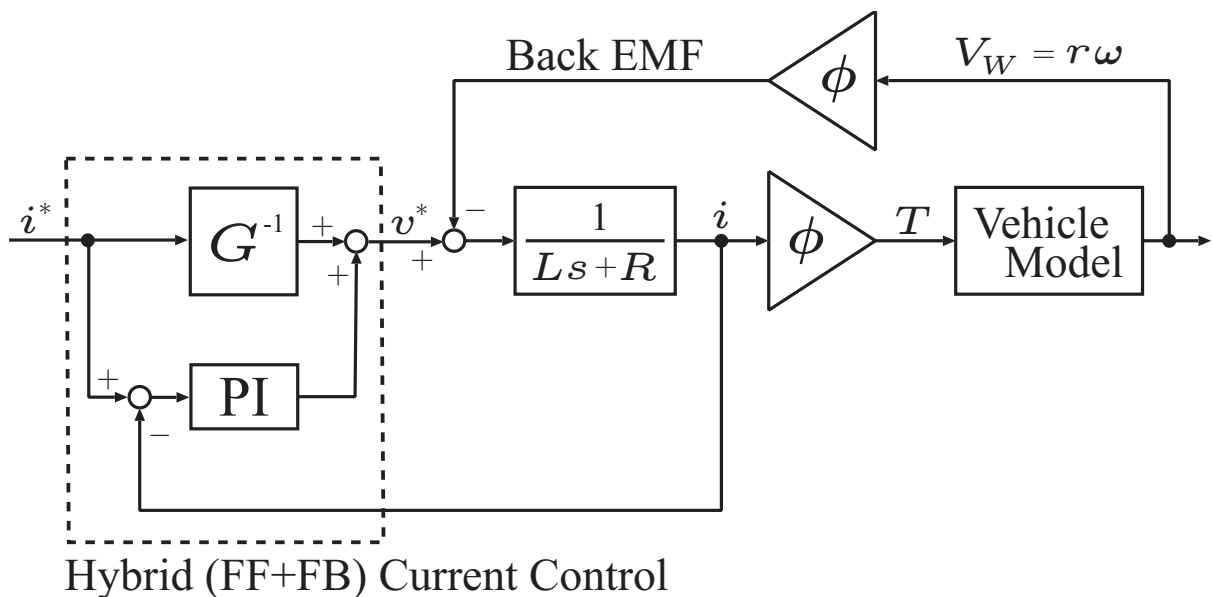
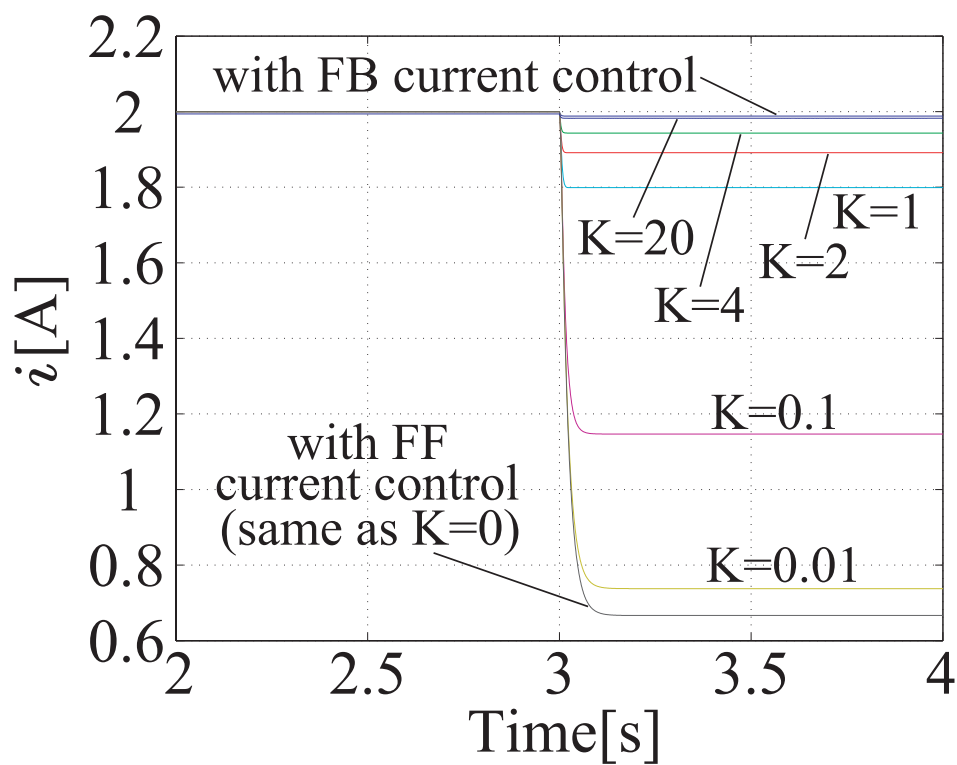
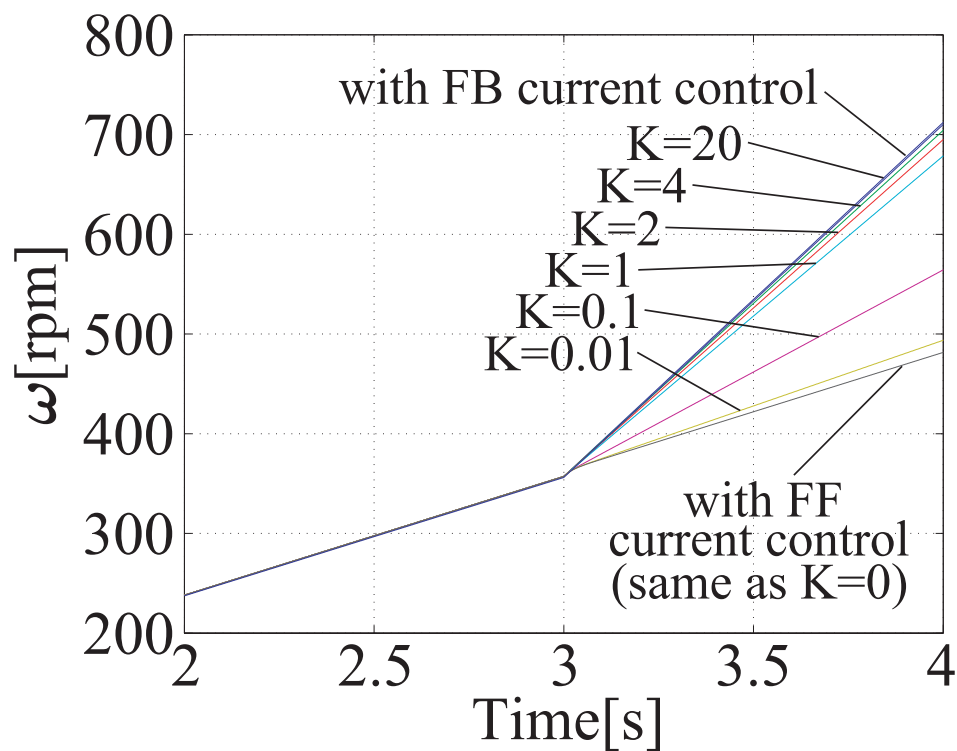


図 6.5: q 軸に着目して単純化したブロック図におけるハイブリッド (FF+FB) 電流制御



(a) モータ電流



(b) モータの回転速度

図 6.6: シミュレーションによるハイブリッド (FF+FB) 電流制御の検討

第7章 「東大カドウェル号」の製作と実験

本章では、第6章で提案したハイブリッド（FF+FB）電流制御によるスリップ抑制を実現するために、実車両「東大カドウェル号」を製作し、実験を行い、その有効性を検証する。

7.1 実験用電気自動車「東大カドウェル号」

図7.1及び図7.2に示す東大カドウェル号は、2基のブラシレス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。図7.2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（パラレル96V系）のコンタクタ及び電力変換回路などを含んでいる。また、表7.1に東大カドウェル号の仕様を示す。

ここで、本題からは少し外れるが、次節以降の実験結果を検討する際に必要となる東大カドウェル号における「時間軸」について簡単に述べる。まず、車両制御PCにおける時間は、グラフ中ではTime(PC)と表現する。本来は、この時間に全てのデータの時間が統一されるべきなのだが、MICで処理された後のトルク指令、q軸の電流指令及び計測値、モータの回転速度に関しては、MIC上にそのデータがあるため、これらのデータをモニタするためのモニタPCを別途用意して記録している。そこで、右側MICにおける時間をTime(RightMIC)、左側モータにおける時間をTime(LeftMIC)と表現している。これら3つの時間軸はすべて独立となるが、本稿に掲載している実験結果のグラフでは、そのまま比較できるような範囲にスケールしている。また、車両制御PCに取り込まれるモータの回転速度は、レゾルバの1相分をカウントして車両制御PC上で演算したものであるため、精度が悪く、数秒程度の時間におけるスリップ抑制の際に注目すべき瞬間的な変化を捉えることができないため、あくまで参考値となる。ただし、数十秒程度の時間における全体的な変化を捉えるには十分である。このような事情により、車両制御PC上のモータ回転速度及び、この値を元に計算されるスリップ率については検討の際に注意が必要となる。

この問題は、実験後に行った第A.1章（付録）に示す第3期改造により、MICから専用DAボードを用いてデータを車両制御PCに取り込むことで解決している。従って、今後の実験においては、時間軸は基本的に車両制御PCの時間軸に統一され、スリップ率を求める時など実験結果を分析する際には、より精度の高い情報を扱うことが可能となる。

7.1. 実験用電気自動車「東大カドウェル号」



図 7.1: 実験用電気自動車「東大カドウェル号」～東京大学生産技術研究所前にて～

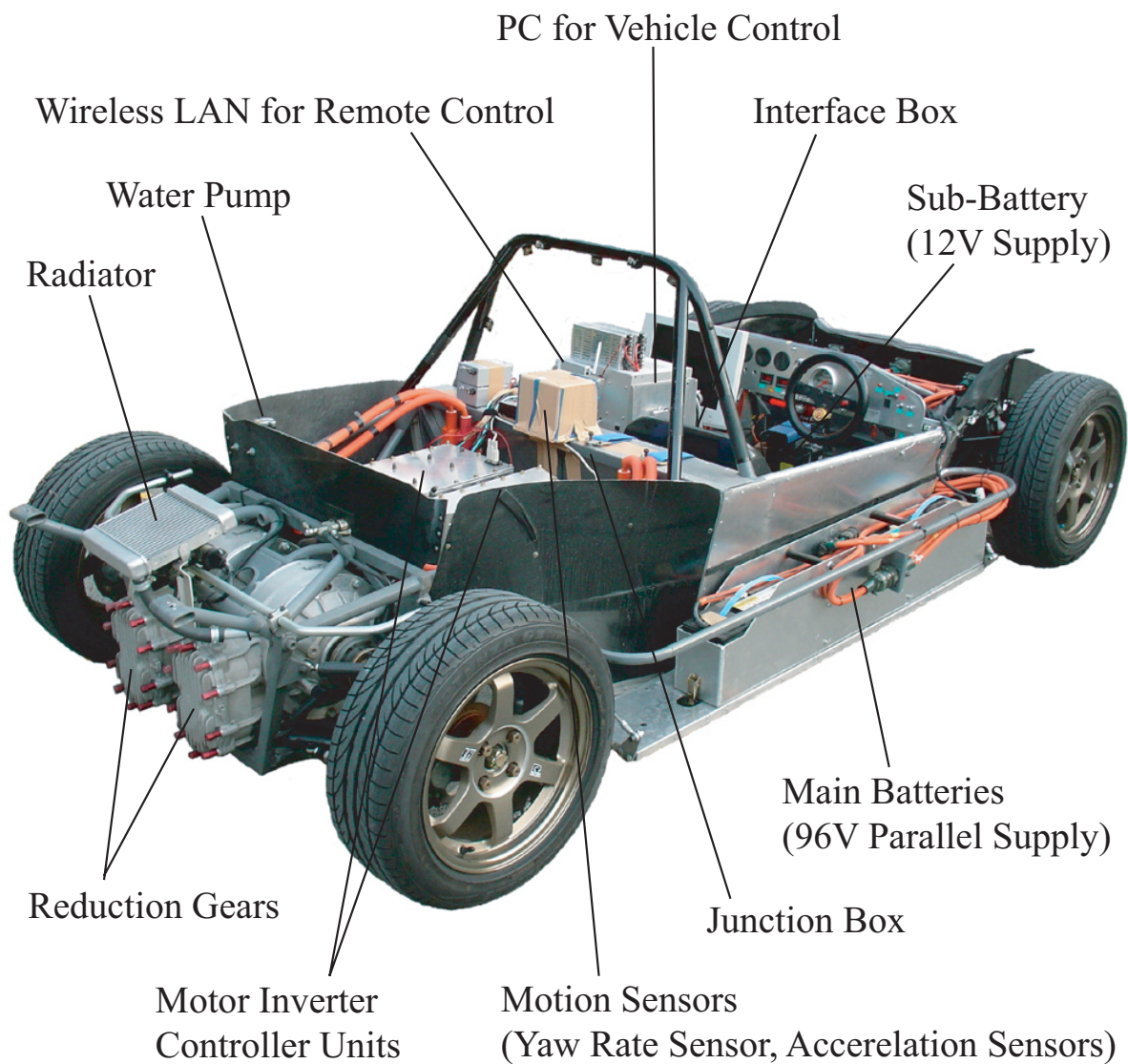


図 7.2: 「東大カドウェル号」の構成

表 7.1: 「東大カドウェル号」の仕様

Drivetrain	2 BLDC Motors / Hitachi, Ltd.
Max. Power	24 [kW] (respectively)
Max. Torque	130 [Nm] (respectively)
Gear Ratio	4.98
Battery	Lead Acid
Total Voltage	Parallel 96 [V] (2*8 units)
Base Chassis	Tokyo R&D CADWELL
Wheel Base	2350 [mm]
F/R Track	1300/1270 [mm]
Overall Length/Width/Height	3800/1550/1030 [mm]
Total Weight	1000 [kg]
F/R Tire Size	205/60R13
Controller	
CPU	Pentium III 850 [MHz]
OS	Vine 2.6r1 with ART-Linux

7.2 乾燥路面での走行試験

FB 電流制御（従来手法）及びハイブリッド（FF+FB）電流制御（提案手法）における一般的な加速性能を比較するための実験を行う。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（60[Nm]）で加速する。本実験をはじめ、本論文で行うすべての実験では、左右同一指令を与えるものとする。従来手法においては、FB 電流制御としての最適ゲインを用いるが、提案手法においては、ハイブリッド電流制御として、FF フィルタを用いるとともに、FB 電流制御としての最適比例ゲインの 70 % の値を組み合わせて用いた。

実験結果をそれぞれ図 7.3 及び図 7.4 に示す。これらより、両手法において同じ加速性能を得ていることが分かる。

また、q 軸電流を拡大してみると、図 7.5 及び図 7.6 となる。これらより、提案手法においては、電流制御の比例ゲインを最適値から下げている分、電流の波形が若干荒くなっている様子が確認できる。

以上より、乾燥路面の走行といった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る分、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。

7.2. 乾燥路面での走行試験

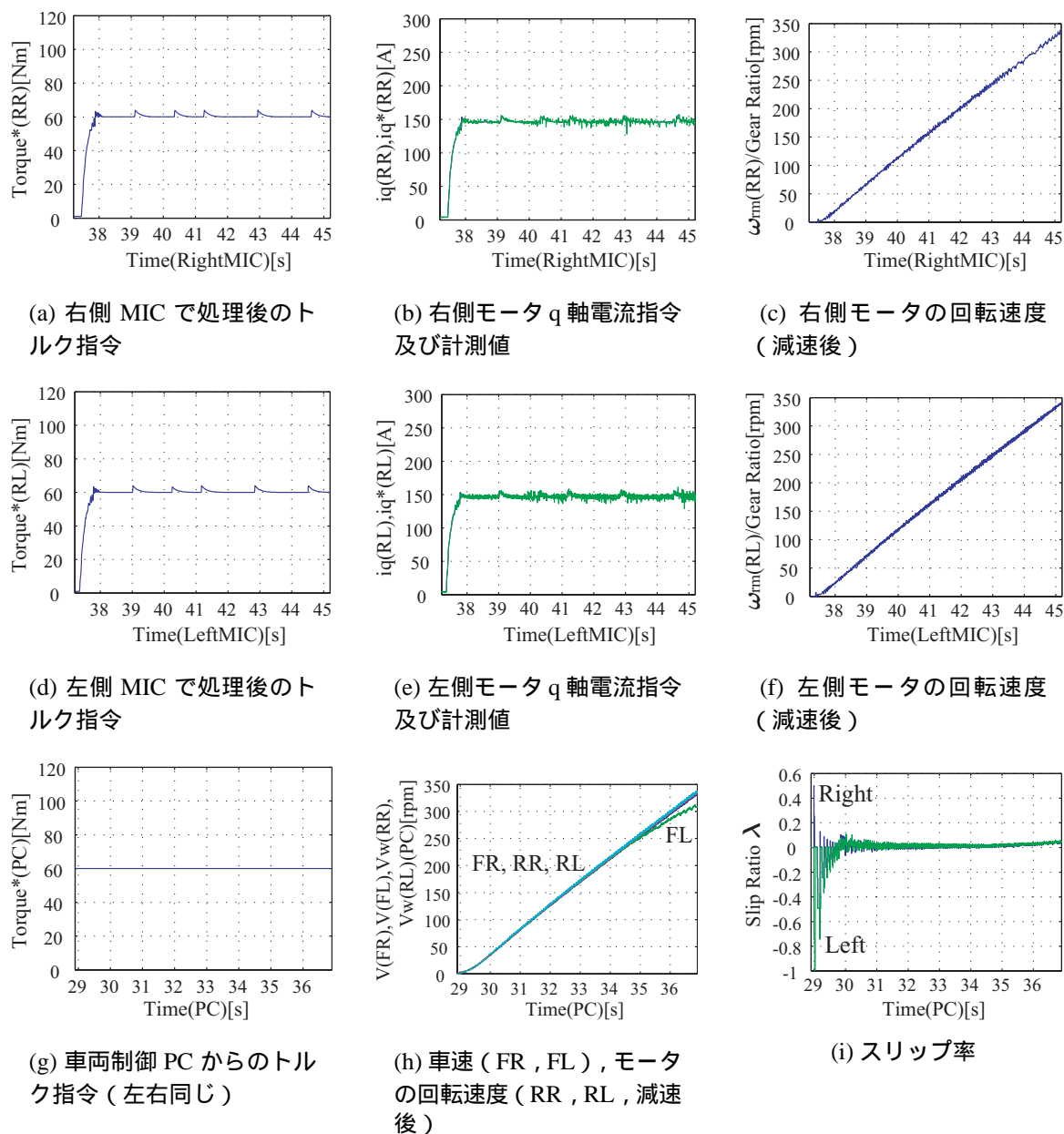


図 7.3: FB 電流制御 (従来手法) を用いた乾燥路面での走行試験結果【データ番号:exp0292】

7.2. 乾燥路面での走行試験

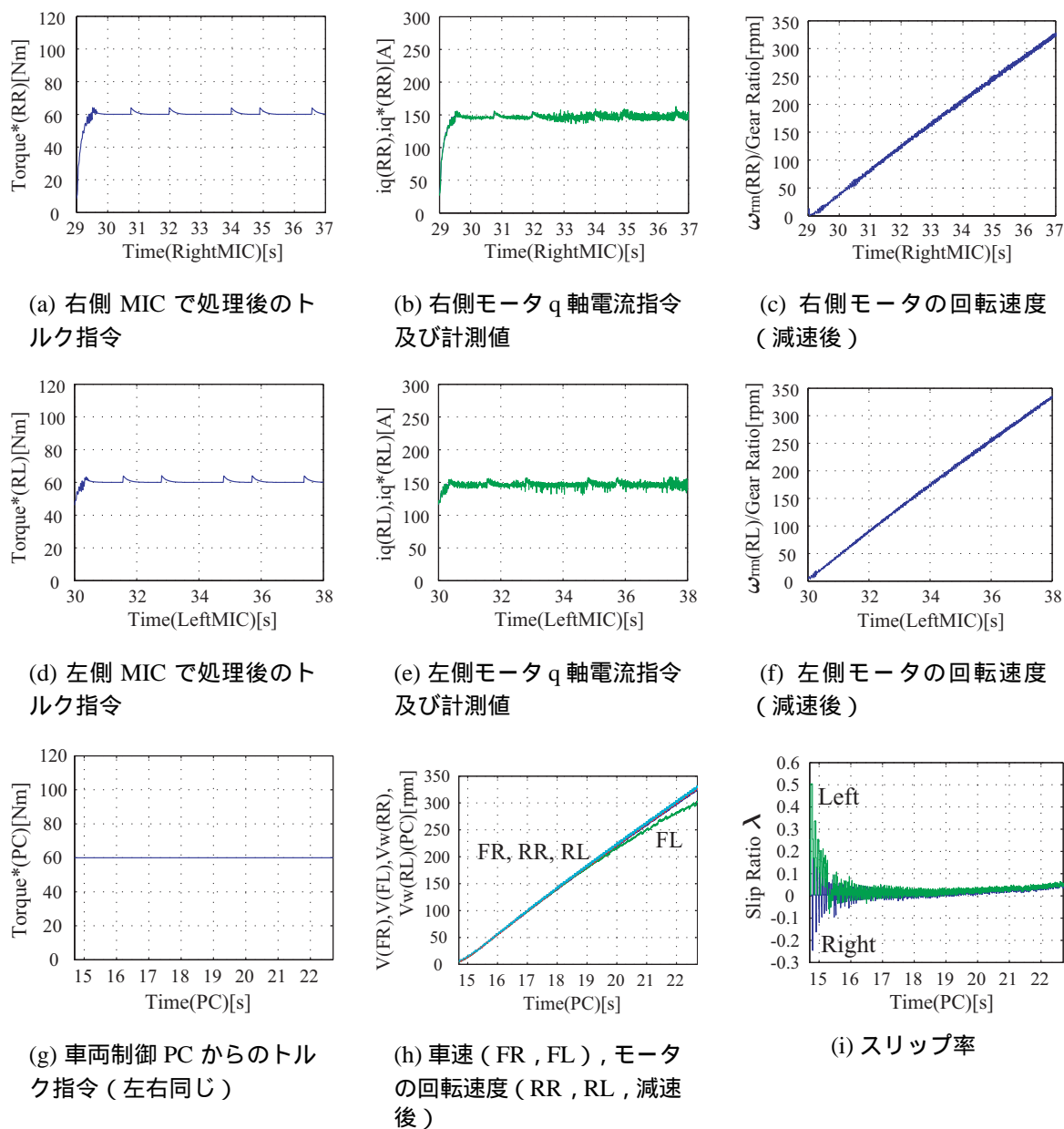


図 7.4: ハイブリッド (FF+FB) 電流制御 (提案手法) を用いた乾燥路面での走行試験結果【データ番号: exp0297】

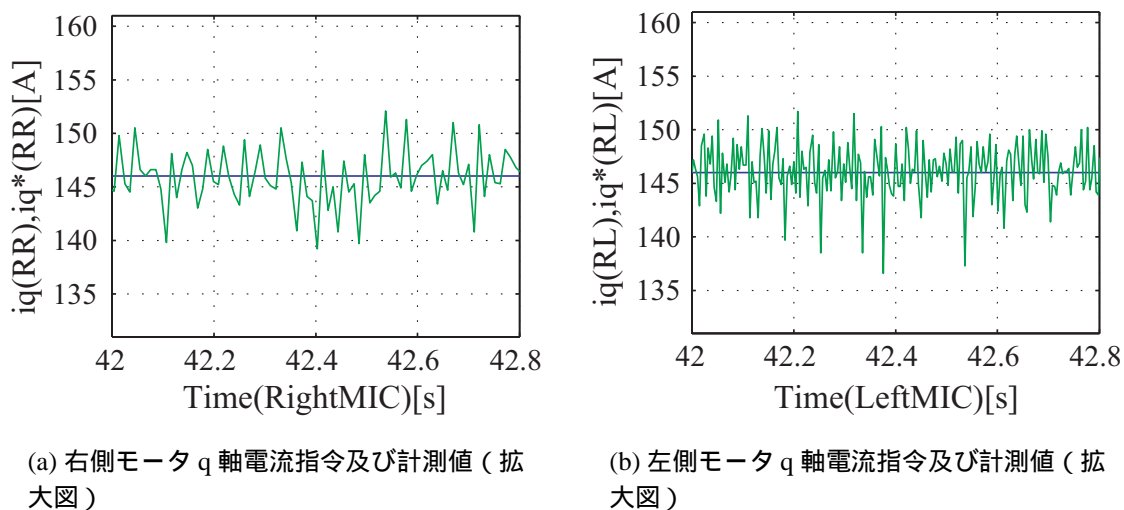


図 7.5: FB 電流制御 (従来手法) を用いた乾燥路面での走行試験結果: 一部拡大図【データ番号: exp0292】

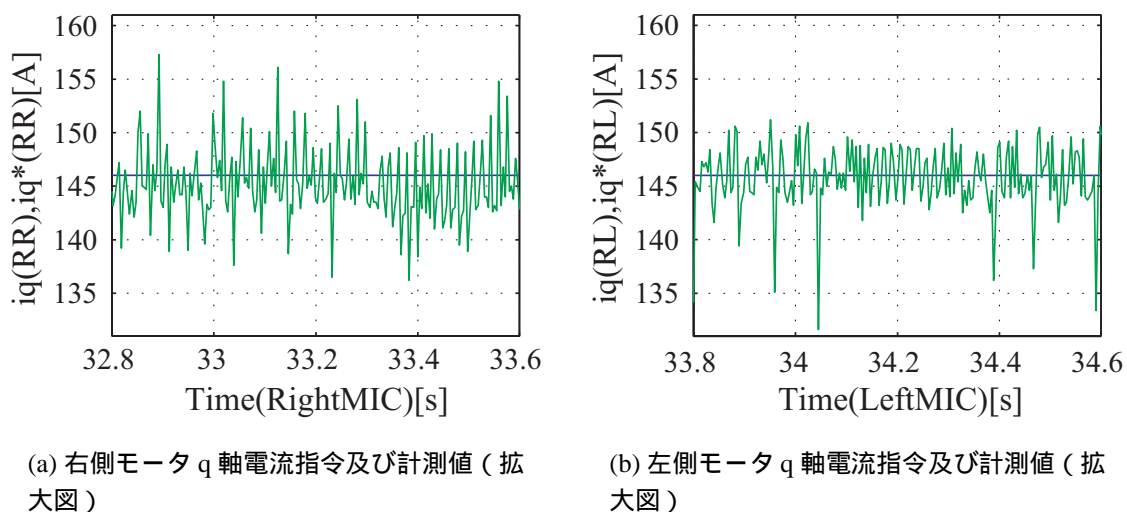


図 7.6: ハイブリッド (FF+FB) 電流制御 (提案手法) を用いた乾燥路面での走行試験結果: 一部拡大図【データ番号: exp0297】

7.3 1次元増粘着制御

車両の前後方向のみの運動を考えた1次元運動において、FB電流制御（従来手法）及びハイブリッド（FF+FB）電流制御（提案手法）を用いてスリップ抑制制御の実験を行う。濡れたアルミ板（滑りやすい路面）の上を走行する実験及びテストコースの低 μ 路（もっと滑りやすい路面）を走行する実験を行う。

7.3.1 濡れたアルミ板上の走行

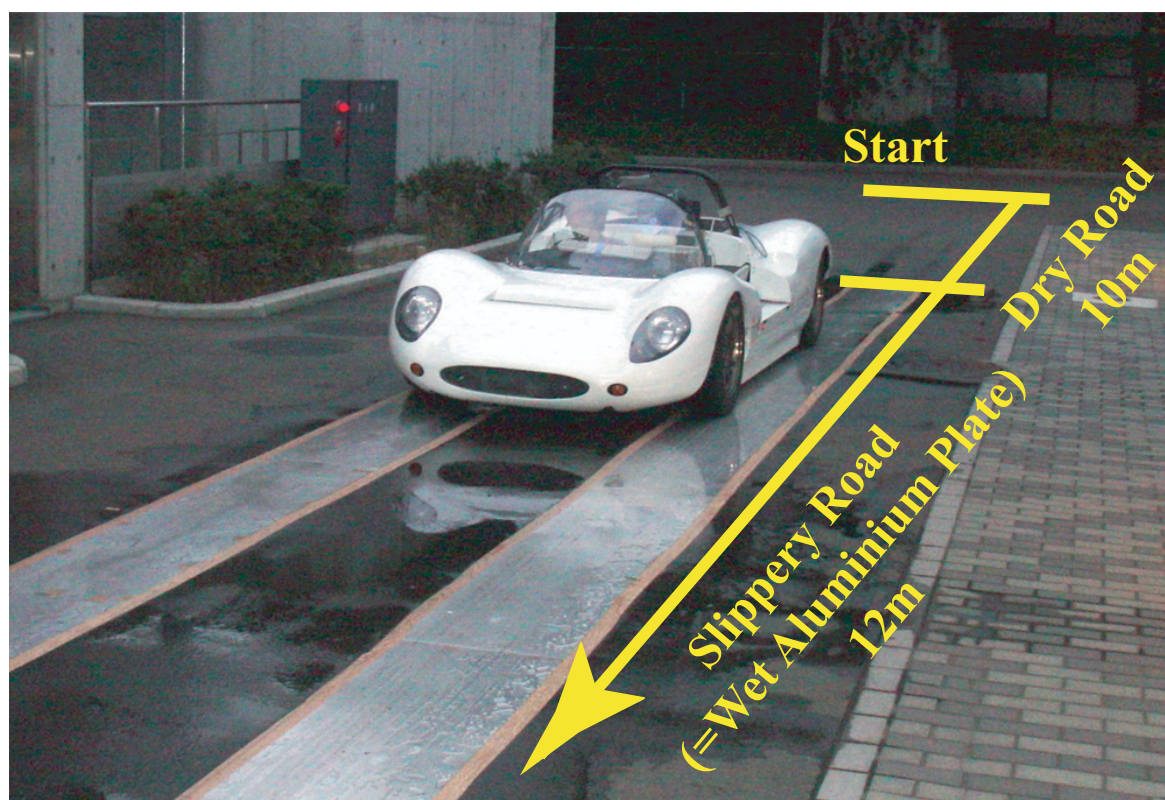


図 7.7: 1次元増粘着制御実験の様子

図 7.7 に示すように、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（乾燥アスファルト路面）から滑りやすい路面（濡れたアルミ板）へ進入する実験を行う。滑りやすい路面への進入と同時に図 6.2 に示したトルク特性及び図 6.3 に示した電流特性の限界まで及ぶようなスリップが起こるように、あらかじめ調査しておいた一定トルク指令（80[Nm]）を用いる。

FB電流制御としての最適ゲインを用いる従来手法における実験結果を図 7.8～図 7.10 に示した。また、FFフィルタを用いるとともに、FB電流制御としての最適比例ゲインの75%の値を組み合わせる提案手法における実験結果を図 7.11～図 7.13 に示した。

図 7.8 及び図 7.11 より、走行実験の全体を見た場合、車両制御PCから80[Nm]の一定トルク指令を出しているにもかかわらず、MICで処理後のトルク指令では、部分的にトルク指令が下がっているところが存在する。これは、モータの回転速度の上昇に伴って、

図 6.2 に示したトルク特性上の限界点に達したためである。また、一般にトルク指令をもとに、 q 軸電流指令が決定するが、こちらの場合も、モータの回転速度の上昇に伴って、図 6.3 に示した電流特性上の限界点に達した場合は、指令値が下がることになる。トルク特性及び電流特性は、モータの特性に基づいて、それぞれ複合的に影響を及ぼす。このため、スリップ抑制制御の効果について検討するためには、これらの限界点に影響されない部分に着目する必要がある。

そこで、各限界点に影響されていないスリップの瞬間の様子を図 7.9 及び図 7.12 に示した。これらの実験結果より、従来手法においてはスリップの発生時にも、FB 電流制御が指令通り一定電流を保とうとするため、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瞬間的かつ効果的なトルク（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。

また、 q 軸電流についてさらに拡大した様子を図 7.10 及び図 7.13 に示した。これらの図より、 q 軸検出電流について、その微小の変化を観察すると、スリップが発生した際に、提案手法においては、瞬間的なトルク垂下特性が見られる。一般に、スリップが起こっても、トルク垂下特性によりモータの回転速度の急上昇が抑制され、再粘着する。そのため、シミュレーションで確認できたような大きなトルク垂下特性は見られないが、その効果は有効に現れていることが確認できる。

7.3.2 低 μ 路の走行

濡れたアルミ板よりも、さらに滑りやすい状況としてテストコースの低 μ 路で実験を行う。

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（乾燥アスファルト路面）から滑りやすい路面（低 μ 路）へ進入する実験を行う。滑りやすい路面への進入と同時に図 6.2 に示したトルク特性及び図 6.3 に示した電流特性の限界まで及ぶようなスリップが起こるように、あらかじめ調査しておいた一定トルク指令（60[Nm]）を用いる。

FB 電流制御としての最適ゲインを用いる従来手法における実験結果を図 7.14 に示した。また、FF フィルタを用いるとともに、FB 電流制御としての最適比例ゲインの 70% の値を組み合わせる提案手法における実験結果を図 7.15 に示した。

これらの実験結果より、従来手法及び提案手法の両方において、走行開始から程なくして、急激なスリップによりモータの回転速度が急上昇してしまい、トルク及び電流特性における限界点に達してしまっていると考えられる。両手法におけるモータの回転速度を比較すると、提案手法の方が従来手法よりも回転速度の上昇を抑制しているようにも見えるが、トルク及び電流特性の影響をかなり受けているため、トルク垂下特性の効果について議論できるような状況ではない。

以上より、より滑りやすい状況下においてスリップ抑制制御の実験を行った場合、走行開始から程なくして、モータの回転速度が急上昇してしまい、トルク及び電流特性上の限界点に達してしまうので、特性の影響をかなり受けることになるため、トルク垂下特性の効果を実験で議論できるような実験はできないことが分かった。トルク垂下特性によるスリップ抑制制御は、理論的には路面の滑りやすさ（ μ の大きさ）に影響を受けないものである。しかしながら、提案手法によるスリップ抑制の仕組みは、スリップが発生した

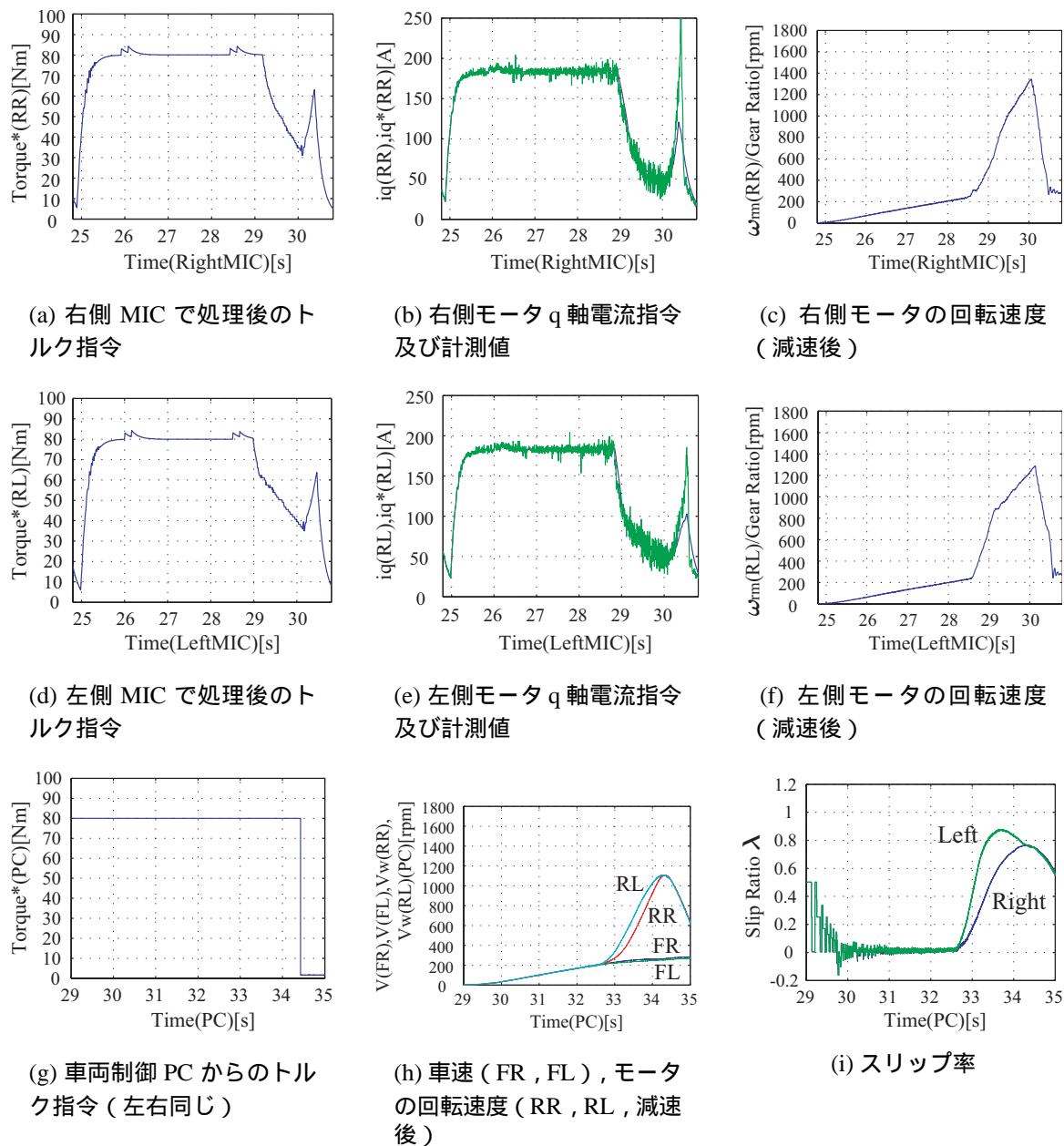
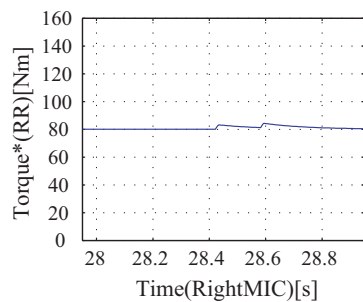
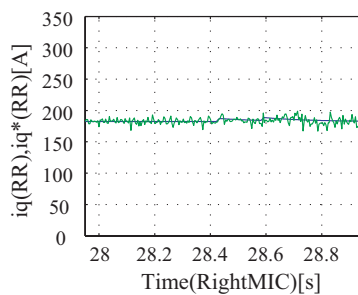


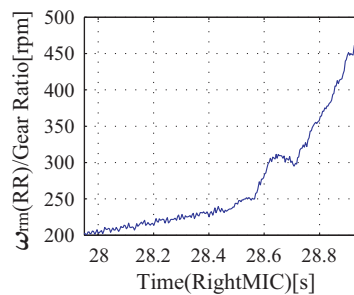
図 7.8: FB 電流制御 (従来手法) を用いた 1次元増粘着制御実験結果【データ番号:exp0140】



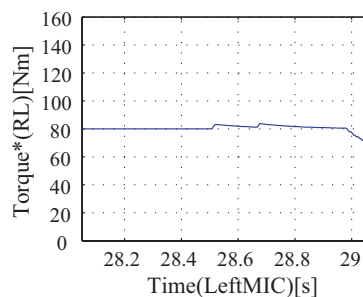
(a) 右側 MIC で処理後のトルク指令



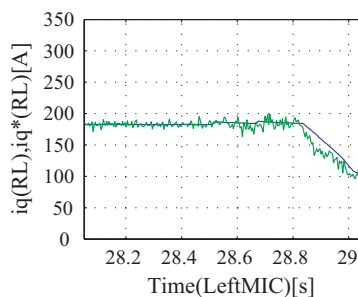
(b) 右側モータ q 軸電流指令及び計測値



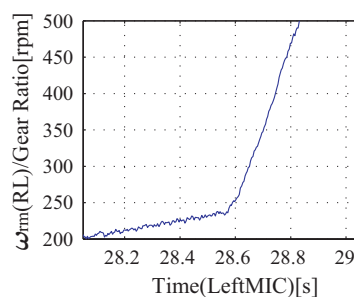
(c) 右側モータの回転速度 (減速後)



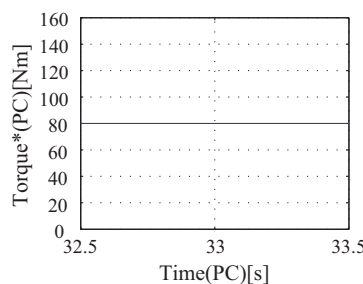
(d) 左側 MIC で処理後のトルク指令



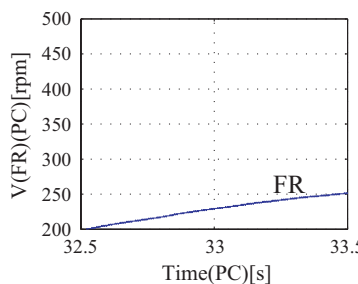
(e) 左側モータ q 軸電流指令及び計測値



(f) 左側モータの回転速度 (減速後)

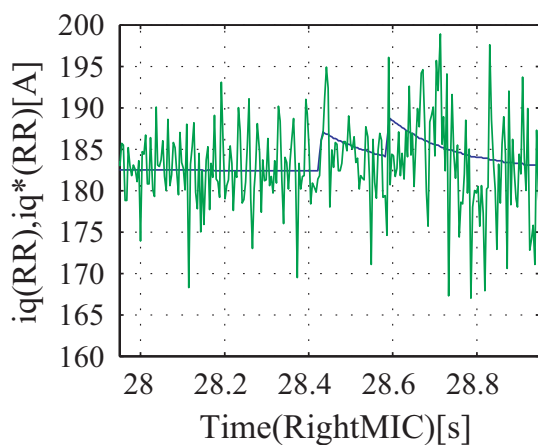


(g) 車両制御 PC からのトルク指令 (左右同じ)

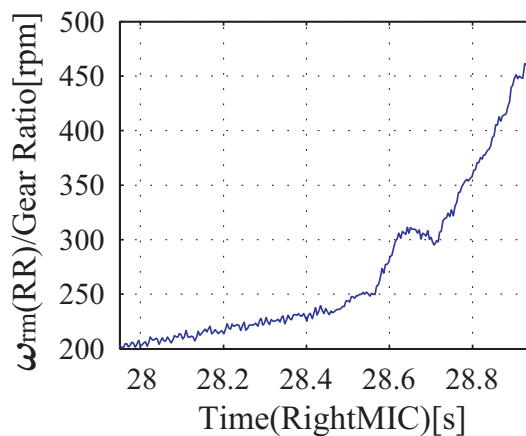


(h) 車速 (FR)

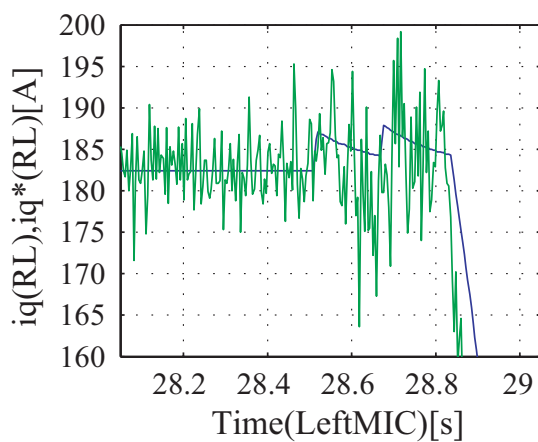
図 7.9: FB 電流制御 (従来手法) を用いた 1 次元増粘着制御実験結果: スリップの瞬間の拡大図【データ番号: exp0140】



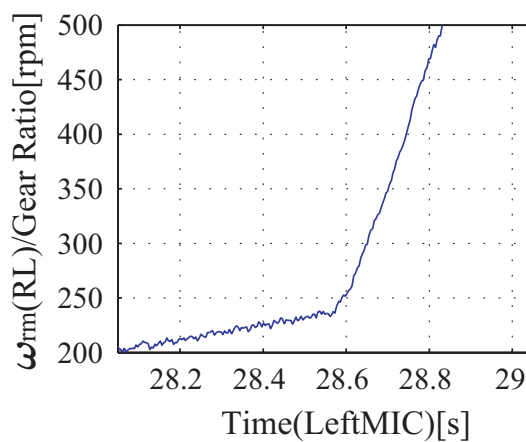
(a) 右側モータ q 軸電流指令及び計測値 (拡大図)



(b) 右側モータの回転速度 (減速後, 拡大図)



(c) 左側モータ q 軸電流指令及び計測値 (拡大図)



(d) 左側モータの回転速度 (減速後, 拡大図)

図 7.10: FB 電流制御 (従来手法) を用いた 1 次元増粘着制御実験結果: さらに拡大図【データ番号: exp0140】

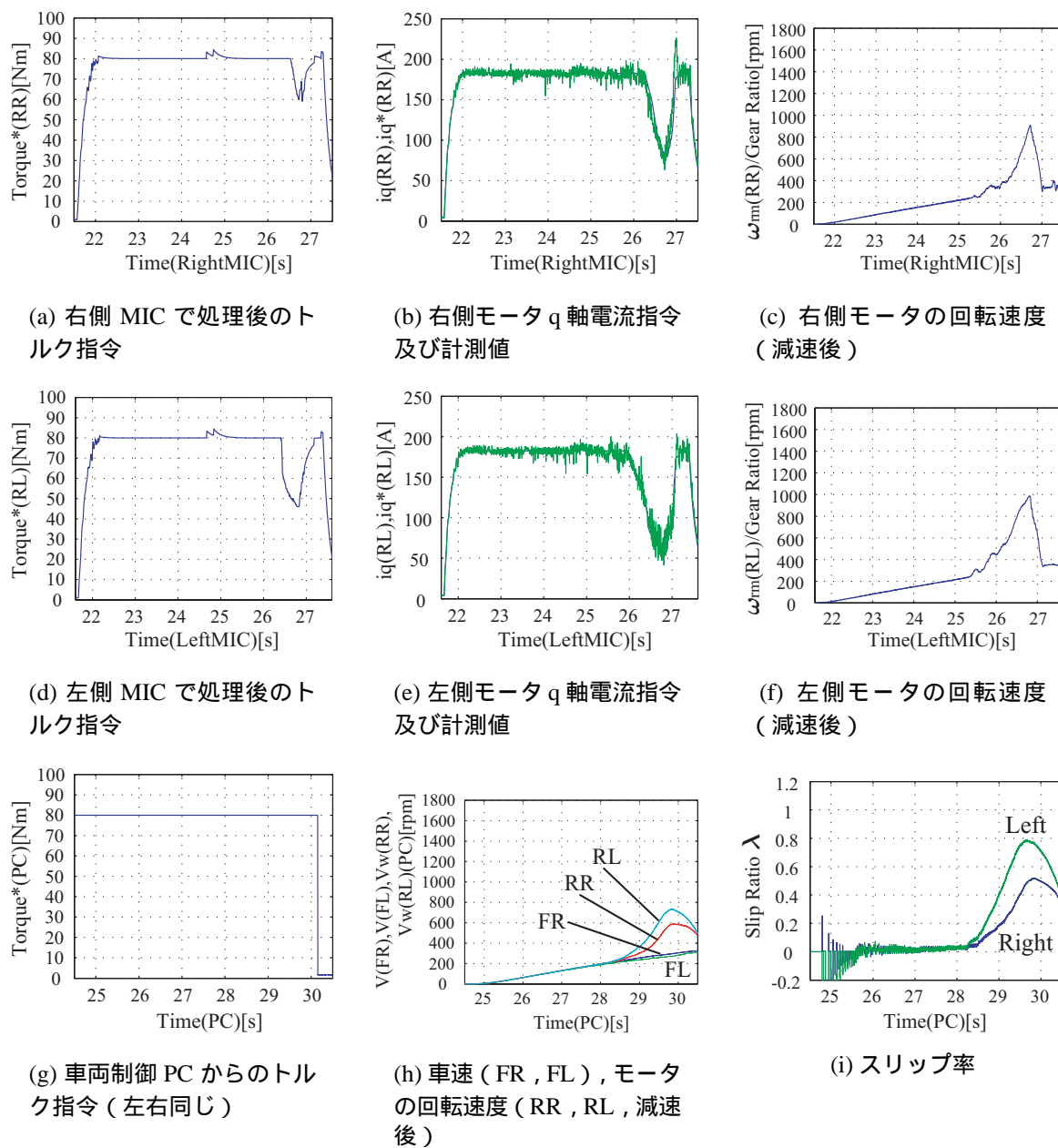
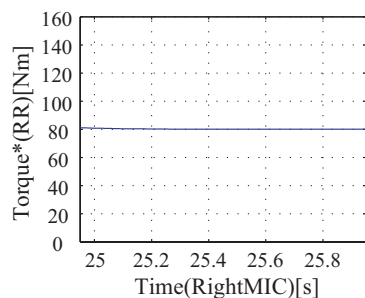
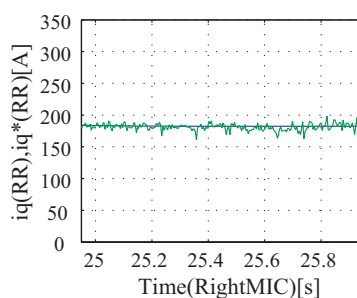


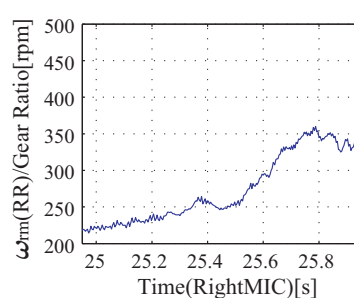
図 7.11: ハイブリッド (FF+FB) 電流制御 (提案手法) を用いた 1 次元増粘着制御実験結果【データ番号 : exp0144】



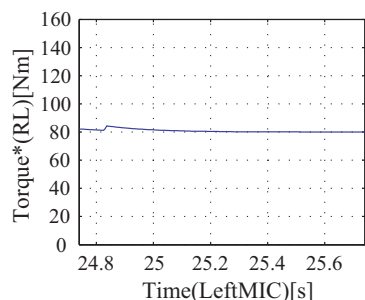
(a) 右側 MIC で処理後のトルク指令



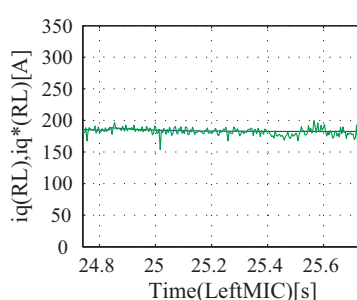
(b) 右側モータ q 軸電流指令及び計測値



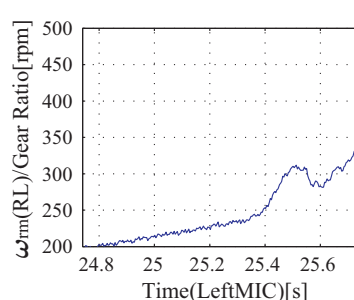
(c) 右側モータの回転速度 (減速後)



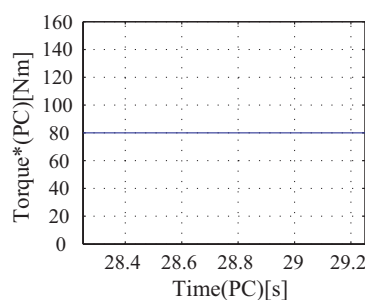
(d) 左側 MIC で処理後のトルク指令



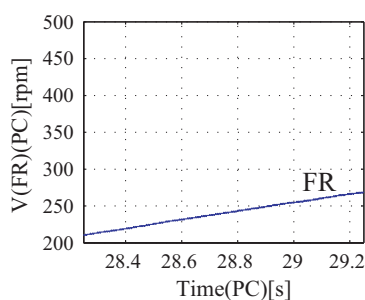
(e) 左側モータ q 軸電流指令及び計測値



(f) 左側モータの回転速度 (減速後)

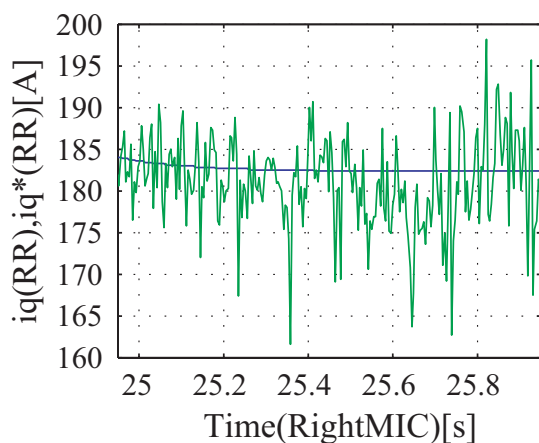


(g) 車両制御 PC からのトルク指令 (左右同じ)

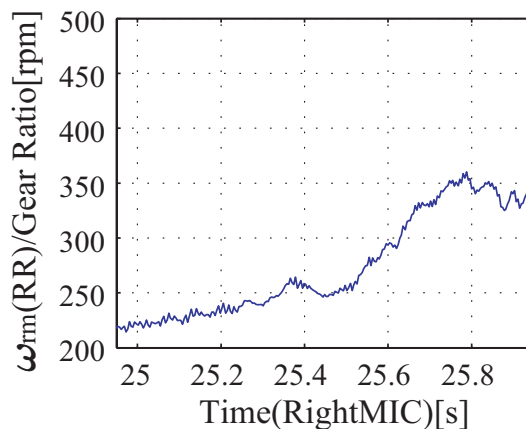


(h) 車速 (FR)

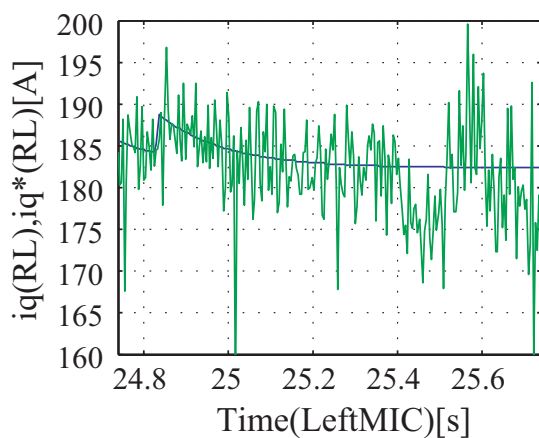
図 7.12: ハイブリッド (FF+FB) 電流制御 (提案手法) を用いた 1 次元増粘着制御実験結果: スリップの瞬間の拡大図【データ番号: exp0144】



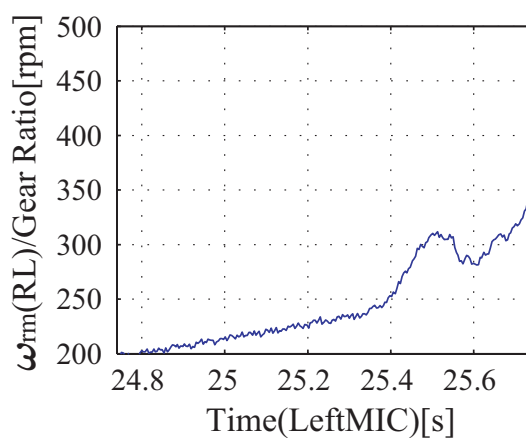
(a) 右側モータ q 軸電流指令及び計測値 (拡大図)



(b) 右側モータの回転速度 (減速後, 拡大図)



(c) 左側モータ q 軸電流指令及び計測値 (拡大図)



(d) 左側モータの回転速度 (減速後, 拡大図)

図 7.13: ハイブリッド (FF+FB) 電流制御 (提案手法) を用いた 1 次元増粘着制御実験結果: さらに拡大図【データ番号: exp0144】

7.3. 1次元増粘着制御

際に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ことができるというものであった。すなわち、急激なスリップの場合は、トルク垂下特性によるスリップ抑制効果が現れる前に、最大トルク制御や弱め界磁制御などに基づいて定められるトルク及び電流特性の限界点に達してしまうために、特性曲線に従って、トルク指令や電流指令が下がってしまうのである。

従って、このような状況下においては、トルク垂下特性によるスリップ抑制効果が得られると同時に、トルク及び電流特性の影響を多く受けることになるため、容易にトルク垂下特性の効果のみを議論することはできないのである。

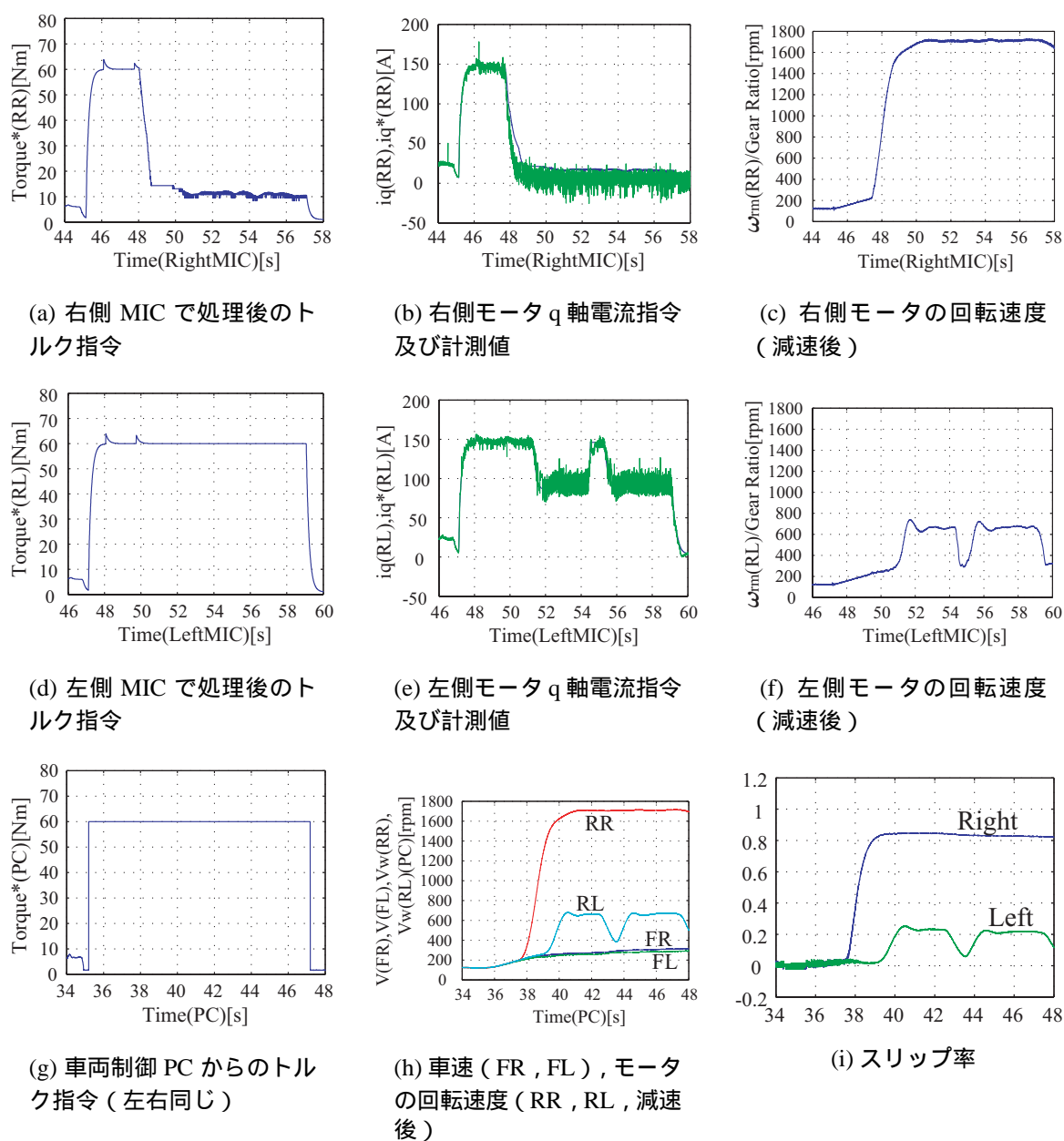


図 7.14: FB 電流制御 (従来手法) を用いた 1 次元増粘着制御実験結果【データ番号: exp0246】

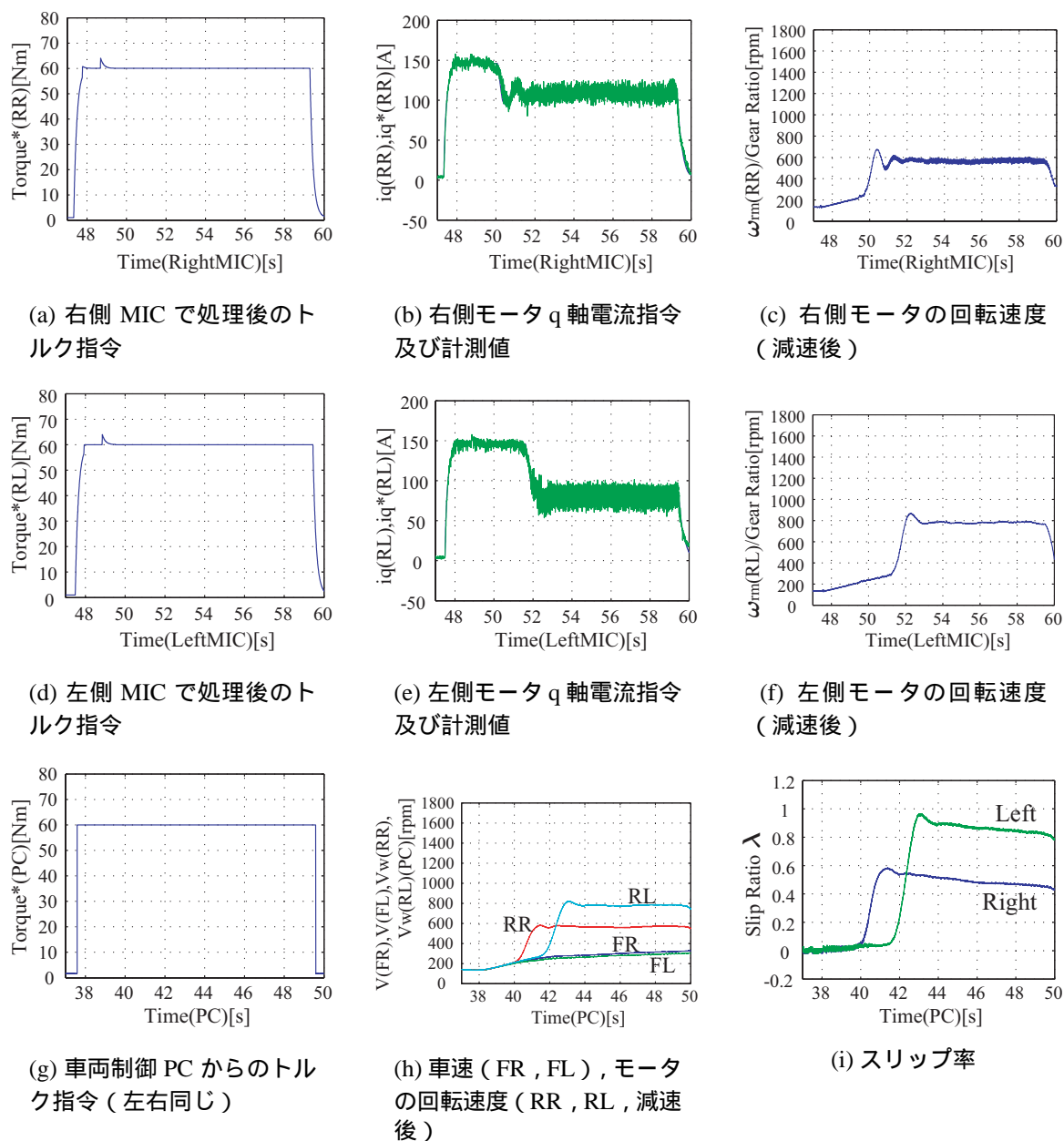


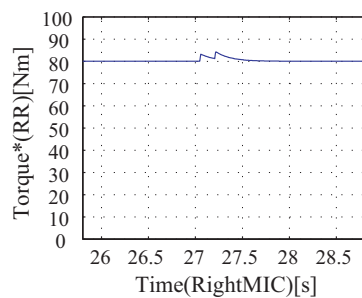
図 7.15: ハイブリッド (FF+FB) 電流制御 (提案手法) を用いた 1 次元増粘着制御実験結果【データ番号 : exp0245】

7.3.3 ハードウェア的な問題点と今後の可能性

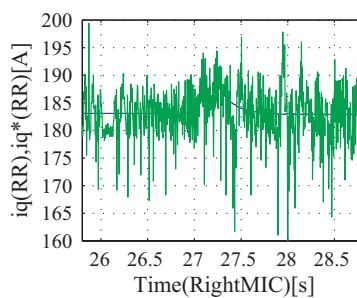
前々項(7.3.1)においては、提案手法において、FFフィルタを用いるとともに、FB電流制御としての最適比例ゲインの75%の値を組み合わせで用いたが、本項では、最適比例ゲインを50%まで下げて、一定トルク指令で加速中に乾燥路面から滑りやすい路面(濡れたアルミ板)に進入する実験を行った。

実験結果を図7.16に示すが、この結果は代表的な失敗例として取り上げる。同図7.16より、問題外なハードウェア的な問題点として、車両制御PCからのトルク指令が左側MICに入っていないため、左後輪(RL)は非駆動輪と化していることが分かる。原因は、車両制御PCと左側MICを結ぶシリアル通信の通信不良だと思われる。濡れたアルミ板の上を走行する実験は大学構内において行ったが、狭い道路にてスリップさせるためハードウェアの状況によっては大変危険である。最適比例ゲインを50%まで下げた提案手法での走行は連続しないで2回行ったが、ともに同じように左後輪が非駆動輪となったため、これ以上は危険と判断して再試行はしなかった。左後輪が非駆動輪となっているため、加速性能は約半分に下がっていて、従来手法の実験結果と単純には比較できないものの、図7.16(c)よりトルク垂下特性によるスリップ抑制の効果が見られるため、ハイブリッド電流制御(提案手法)においてFB電流制御のゲインをさらに下げた場合に、より良好な結果を得られる可能性がある。

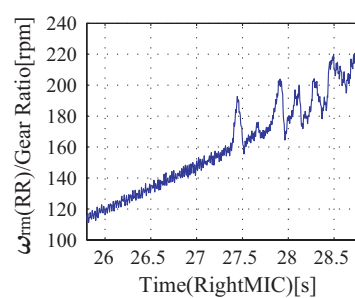
また、同図7.16(c),(f),(h)より、車両制御PCに取り込まれている左右後輪モータの回転速度の精度が悪いことが確認できる。これは、第7.1節で示した理由によるものである。



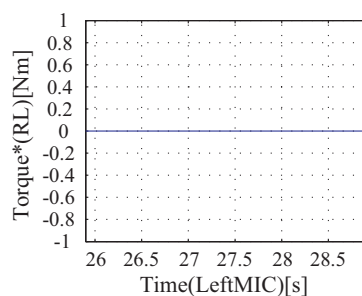
(a) 右側 MIC で処理後のトルク指令



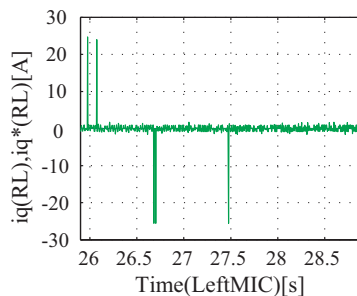
(b) 右側モータ q 軸電流指令及び計測値



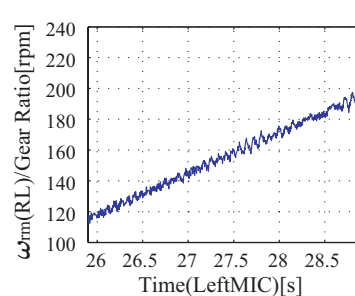
(c) 右側モータの回転速度 (減速後)



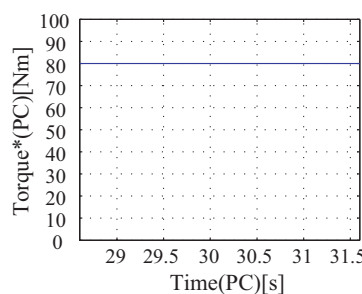
(d) 左側 MIC で処理後のトルク指令



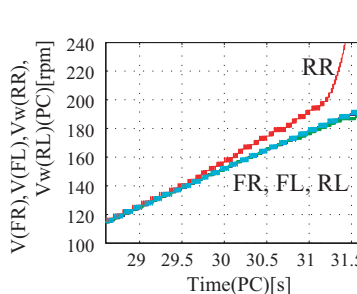
(e) 左側モータ q 軸電流指令及び計測値



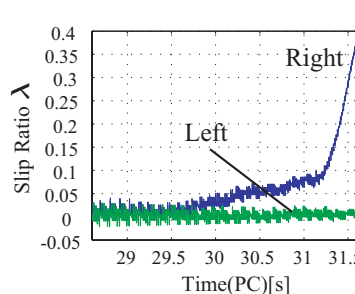
(f) 左側モータの回転速度 (減速後)



(g) 車両制御 PC からのトルク指令 (左右同じ)



(h) 車速 (FR, FL), モータの回転速度 (RR, RL, 減速後)



(i) スリップ率

図 7.16: ハイブリッド (FF+FB) 電流制御 (提案手法) を用いた 1 次元増粘着制御実験結果: 代表的な失敗例【データ番号: exp0142】

7.4 2次元増粘着制御

滑りやすい路面（低 μ 路）上で図 7.17 に示す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、FB 電流制御（従来手法）及びハイブリッド（FF+FB）電流制御（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する実験を行う。従来手法においては、FB 電流制御としての最適ゲインを用いるが、提案手法においては、ハイブリッド電流制御として、FF フィルタを用いるとともに、FB 電流制御としての最適比例ゲインの 70 % の値を組み合わせ用いた。

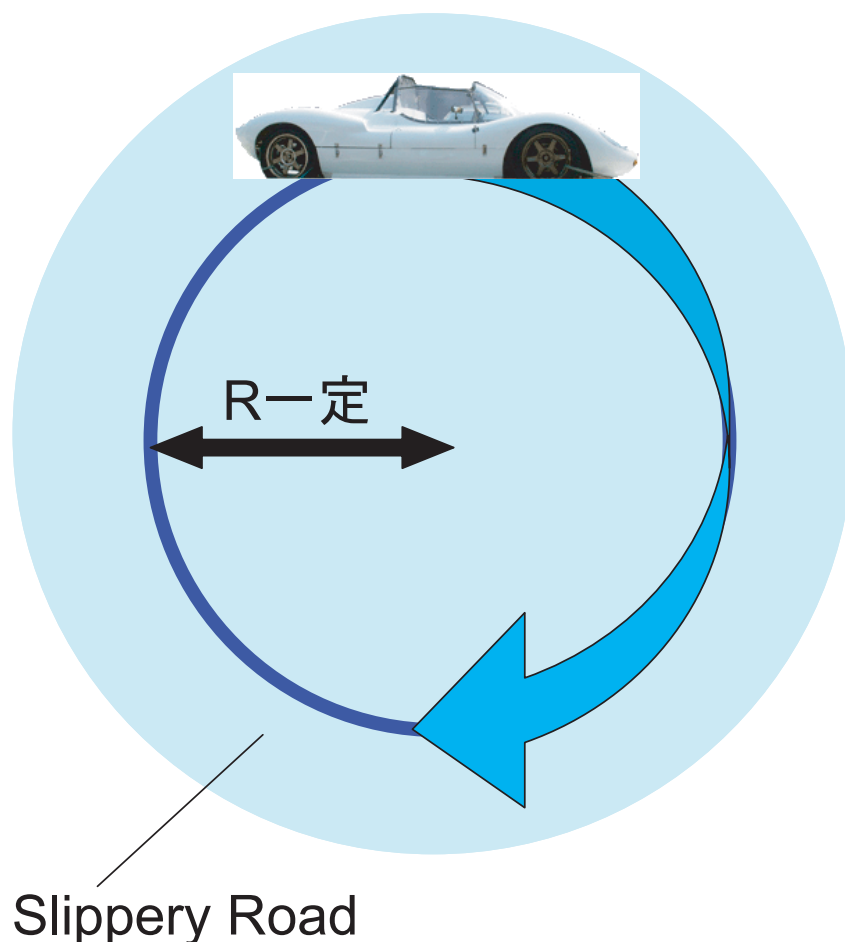


図 7.17: 2次元増粘着制御実験の概要

実験結果をそれぞれ図 7.18 及び図 7.19 に示す。

これらの実験結果より、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こり、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。また、スリップしないように一定の加速性能を得るためには、かなり激しいアクセルワークが必要となった様子も確認できる。これに対して、提案手法においては、スリップの発生時に瞬間的かつ効果的なトルク（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、激しいアクセルワークの必要もなく、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、直線運動に限らず、2次元運動においても、提案手法であるトルク垂下特性を用いたスリップ抑制制御が有効であることを確認できた。

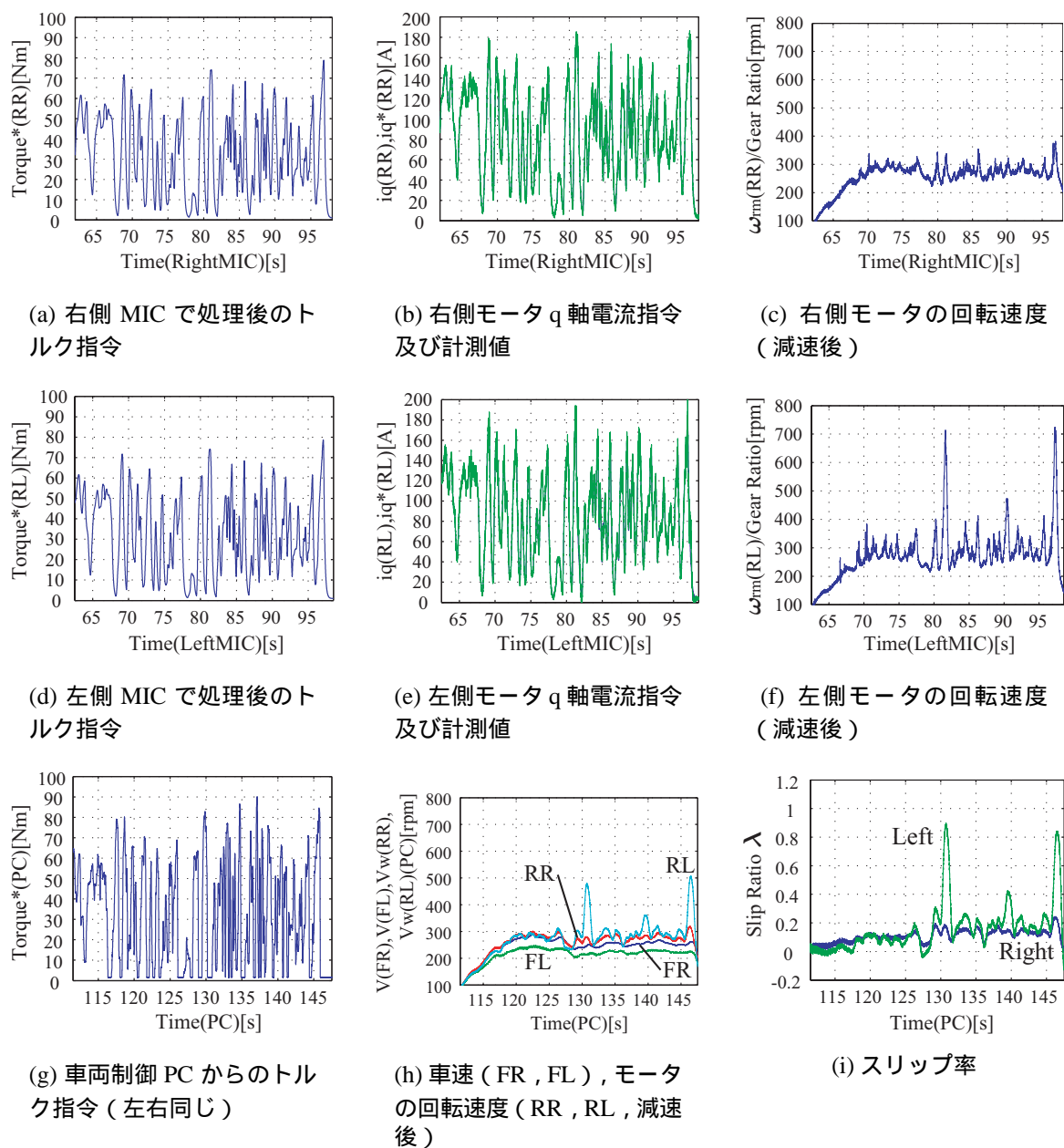


図 7.18: FB 電流制御 (従来手法) を用いた 2 次元増粘着制御実験結果【データ番号: exp0324】

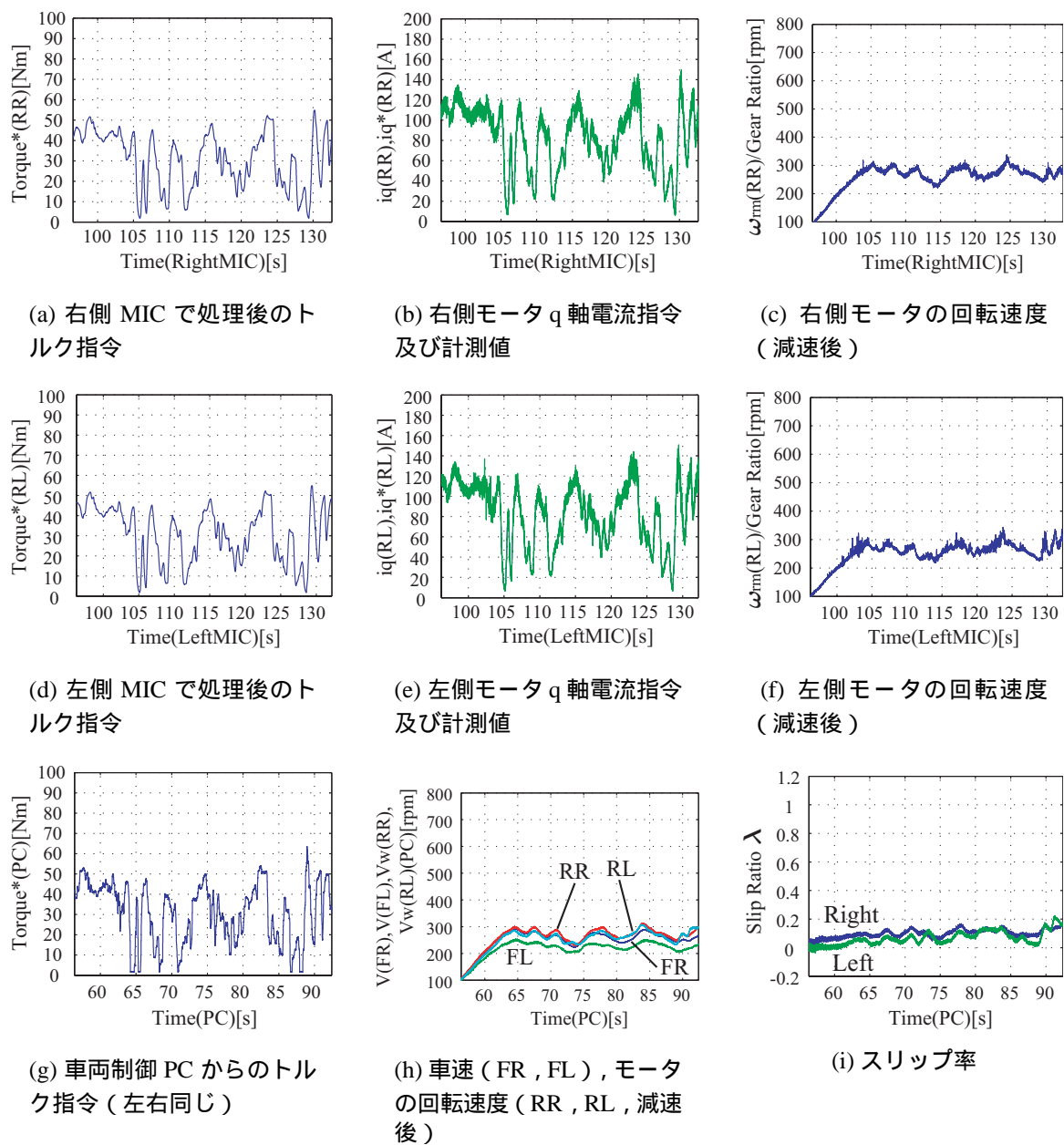


図 7.19: ハイブリッド (FF+FB) 電流制御 (提案手法) を用いた 2 次元増粘着制御実験結果【データ番号 : exp0325】

7.5 実験結果より

本章においては、乾燥路面での走行、濡れたアルミ板及び低 μ 路での走行といった1次元増粘着制御、また、2次元増粘着制御における提案手法の有効性を検証した。

これらの実験結果より、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ることが分かった。一般的な滑りやすい路面においては、提案手法の有効性を確認することができたが、より μ の低い路面においては、トルク垂下特性によるスリップ抑制効果が現れる前に、モータのトルク及び電流特性上の限界点に達してしまうため、特性曲線の影響を多く受けることになり、この場合は、トルク垂下特性の効果のみを議論することはできない。

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。

第8章 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、マイ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、まず、この直流分巻モータのトルク（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た。次に、外乱オブザーバを用いることで、トルク（電流）垂下特性の垂下の大きさや速さを調整する方法を提案した。そして、それぞれの手法がスリップ抑制に有効であることを、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」を用いた基礎実験によって確認した。

また、直流分巻モータでの考え方をもとにして、ブラシレス DC モータを搭載した電気自動車においても、トルク（電流）垂下特性を用いたスリップ抑制を実現する手法を提案し、提案手法の有効性を実車実験によって確認するため、左右後輪を独立駆動する 2 基のブラシレス 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、実験を重ねた結果、提案手法がスリップ抑制に有効であることを実証した。

今後の課題として、

- 外乱オブザーバを用いてトルク（電流）垂下特性を調整する方法を東大カドウェル号においても実現すること。
- 他のモータ制御手法と組み合わせることによって、スリップ抑制により有効な手法へと発展させること。
- 駆動力配分などの運動制御手法と組み合わせることにより、高度な姿勢制御を実現すること。

などに取り組むべきであると考えている。

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、熱心なご指導をいただき、研究活動にとどまらず多くのことにご助言をいただいた指導教員の堀洋一教授に心より感謝いたします。

そして、ハードウェアの製作全般にわたってご指導いただいた内田利之技術官、MGセットでの実験でお世話になったポスドクの李練兵さんをはじめ、日々の研究から実験まで多々ご協力いただいた研究室の皆様にご感謝いたします。

また、実験車両「東大カドウェル号」の開発にあたって、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、テストコースでの実験にご協力いただいた(株)ブリヂストンの皆様をはじめ、たくさんの有益なご助言をいただいた企業の皆様にご感謝いたします。

最後に、支えてくれた友人、家族にも心より感謝いたします。

お世話になった皆様の今後の益々のご発展、ご多幸をお祈りし、謝辞とさせていただきます。

2005年1月28日

小玉晋也

参考文献

- [1] エネルギー白書 2004 年版, 資源エネルギー庁.
- [2] 財団法人 日本自動車研究所 (JARI : Japan Automobile Research Institute) ホームページ, <http://www.jeva.or.jp/>.
- [3] 社団法人 自動車技術会 ホームページ, <http://www.jsae.or.jp/>.
- [4] 清水浩, “電気自動車のすべて”, 日刊工業新聞社, 1992.
- [5] 藤岡健彦, 鎌田実, “自動車プロジェクト開発工学”, 技報堂出版, 2001.
- [6] 大谷昇, “【新エネルギー】現実路線たどるカ州の低排出車法, 燃料電池車も視野 (米国) ”, NEDO 海外レポート, No. 912, pp.16–18, 2003.
- [7] トヨタ自動車株式会社 ホームページ, <http://www.toyota.jp/>.
- [8] Masayuki Soga, Michihito Shimada, Jyun-Ichi Sakamoto and Akihiro Otomo, “**Development of vehicle dynamics management system for hybrid vehicles: ECB system for improved environmental and vehicle dynamic performance**”, JSAE20024667.
- [9] 鶴原吉郎, “環境だけじゃない新型プリウス”, 日経メカニカル *D&M*, No.589, pp.45–52, 2003.
- [10] 日産自動車株式会社 ホームページ, <http://www.nissan.co.jp/>.
- [11] 本田技研工業株式会社 ホームページ, <http://www.honda.co.jp/>.
- [12] 「水素・燃料電池実証プロジェクト」 ホームページ, <http://www.jhfc.jp/>.
- [13] Shiro Matsugaura, Kiyomoto Kawakami and Hiroshi Shimizu, “**Evaluation of Performances for the In-Wheel Drive System for the New Concept Electric Vehicle KAZ**”, in *Proc. EVS19*, Pusan, Korea, 2002.
- [14] 慶應義塾大学電気自動車研究室 Eliica ホームページ, <http://www.eliica.com/>.
- [15] Yoichi 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.
- [16] Shin-ichiro Sakai and Yoichi Hori, “**Advantage of Electric Motor for Anti Skid Control of Electric Vehicle**”, *EPE Journal*, Vol.11, No.4, pp.26–32, 2001.

-
- [17] 宮本徹也, 堀洋一, “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.
- [18] Yoichi 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.
- [19] 小口泰平, “ボッシュ自動車ハンドブック第2版 / **Bosch Automotive Handbook**”, 山海堂 / *Robert Bosch GmbH*, 2003.
- [20] 安部正人, “自動車の運動と制御 [第二版]”, 山海堂, 2003.
- [21] 堀洋一, 大西公平, “制御工学の基礎”, 丸善株式会社, 1997.
- [22] 堀洋一, 大西公平, “応用制御工学”, 丸善株式会社, 1998.
- [23] 杉本英彦, 小山正人, 玉井伸三, “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.
- [24] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, Keita Hatanaka, Yi Tong and Takao Hirasa, “**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.
- [25] 堀洋一, 寺谷達夫, 正木良三, “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.
- [26] 正木良三, “電気自動車用永久磁石電動機とその制御技術”, 電気学会誌, Vol. 119, No.8/9, pp.519–522, 1999.
- [27] 海老原大樹, モータ技術実用ハンドブック編集委員会, “モータ技術実用ハンドブック”, 日刊工業新聞社, 2001.
- [28] 武田洋次, 松井信行, 森本茂男, 本田幸夫, “埋込磁石同期モータの設計と制御”, オーム社, 2001.
- [29] 電気学会 電気自動車駆動システム調査専門委員会, “電気自動車の最新技術”, オーム社, 1999.

研究業績

1. 小玉晋也, 李練兵, 堀洋一, “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.
2. Shinya Kodama, Lianbing Li and Yoichi Hori, “**Skid Prevention for EVs based on the Emulation of Torque Characteristics of Separately-wound DC Motor**”, in *Proc. The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'04-Kawasaki)*, Kawasaki, Japan, 2004, pp.75–80.
3. Lianbing Li, Shinya Kodama and Yoichi Hori, “**Back-EMF based Slip Prevention Controller for EV utilizing Characteristics of DC Motor**”, in *Proc. The 23rd Chinese Control Conference (CCC2004, WB-3-1, S382)*, Wuxi, China, 2004.
4. 小玉晋也, 李練兵, 堀洋一, “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”, 電気学会産業応用部門大会 (JIASC2004, 2-36), pp.415–418, 2004.
5. Yoichi Hori, Lianbing Li, Kimihisa Furukawa, Kenichiro Aoki, Shinya Kodama and Toshiyuki Uchida, “**Future Vehicle driven by Electricity and Control**”, *Poster Session on COE21 International Symposium*, 2004.
6. Lianbing Li, Shinya Kodama and Yoichi Hori, “**Anti-Skid Control for EV Using Dynamic Model Error based on Back-EMF Observer**”, in *Proc. The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2004)*, Busan, Korea, 2004.
7. Shinya Kodama, Lianbing Li and Yoichi Hori, “**Design of a Simulator of One-Wheel EV system for Testing of Skid-Prevention Controller**”, in *Proc. The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2004)*, Busan, Korea, 2004.
8. 小玉晋也, 堀洋一, “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–”, 電気学会自動車研究会 (VT-05-13), pp.71–76, 2005.
9. Lianbing Li, Shinya Kodama and Yoichi Hori, “**A Novel Skid-Prevention Controller based on Smart Speed Pattern Generator**”, in *Proc. The 21st Worldwide International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS21)*, Monte Carlo, Monaco, 2005. (掲載予定)
10. 小玉晋也, 堀洋一, “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 モータを搭載した「東大カドウェル号」による検証—”, 電気学会産業応用部門誌. (現在査読中)



付録A Making of “UOT CADWELL EV”

A.1 「東大カドウェル号」の製作年表

東大カドウェル号の製作及びその基礎実験となるMGセット開発などの年表を図A.1に簡単にまとめる。実験車両というものに完成はないため、常に改造によって進化を遂げていくことになる。同図A.1中の第1期改造では、主に車両制御PCまわりの電源製作や納車時の不具合などを改善した。第2期改造では、モーションセンサやADボードを追加し、モニタPCを車載するための電源系などを製作した。第3期改造では、これまで3系統に分かれていた時間軸を統一するために、MICからリアルタイムで直接データを取り出すDAボードを取り付けた。

また、東大カドウェル号を構成するコンポーネントを中心に、関連機器などについて図A.2～図A.4に、コックピットを図A.5に示した。

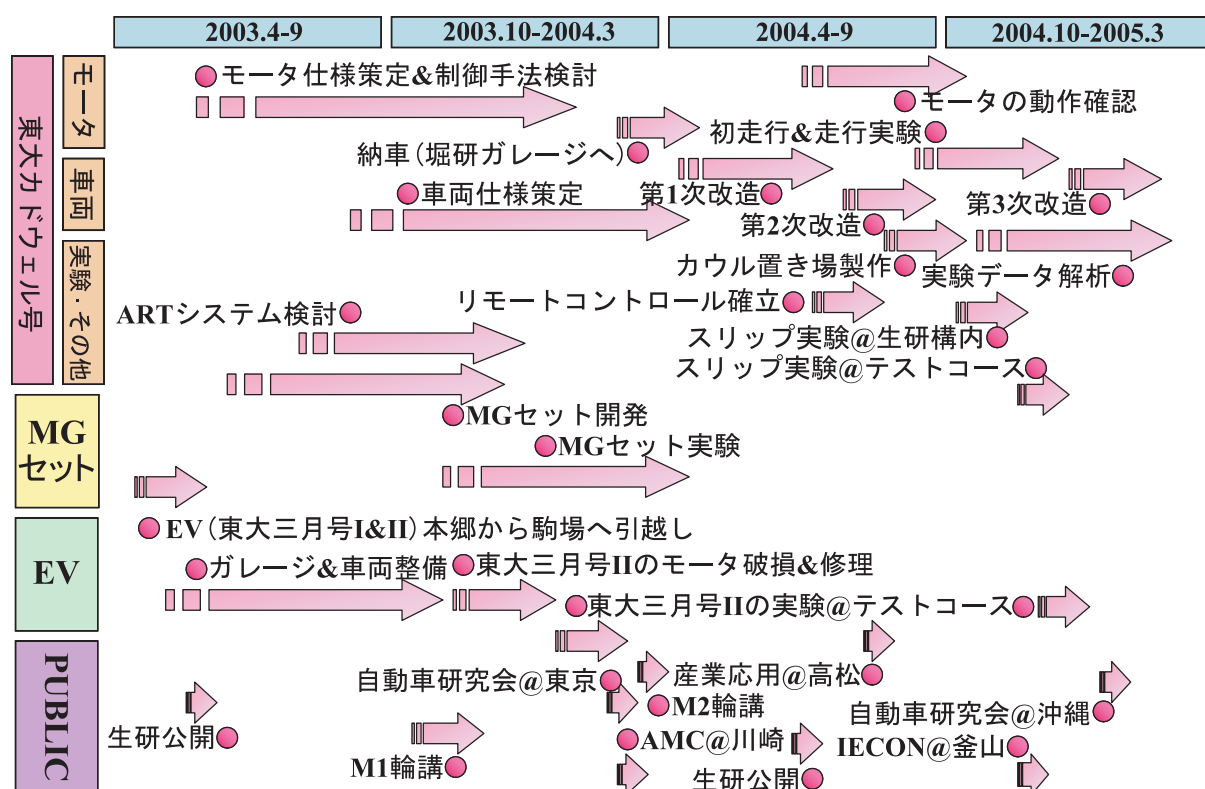
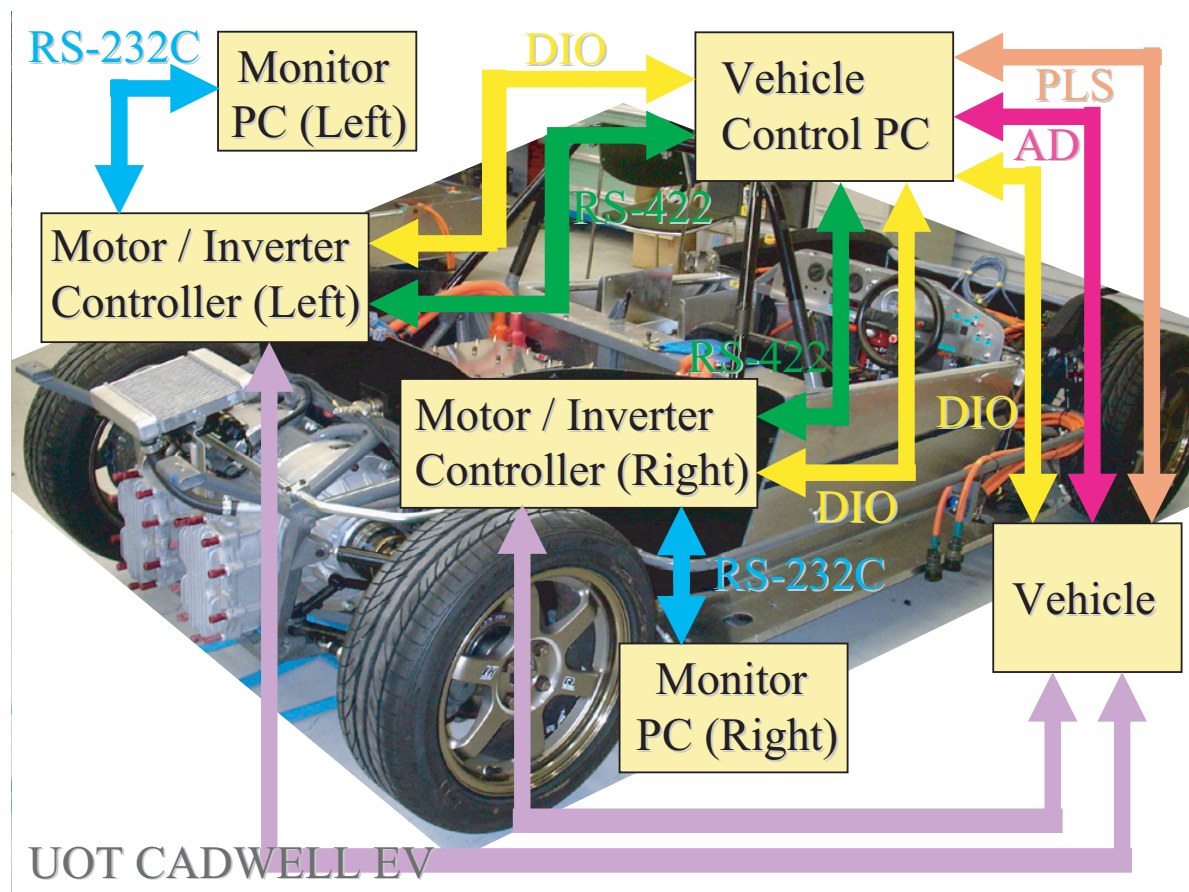


図 A.1: 「東大カドウェル号」の製作年表



(a) システム構成



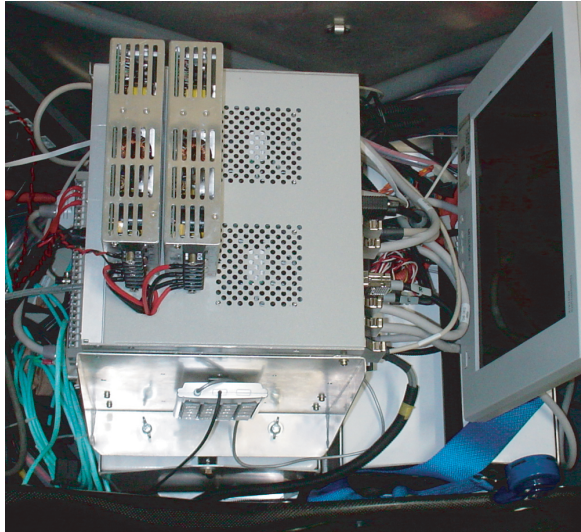
(b) モニタPC
(通常MICの上に防水して搭載)



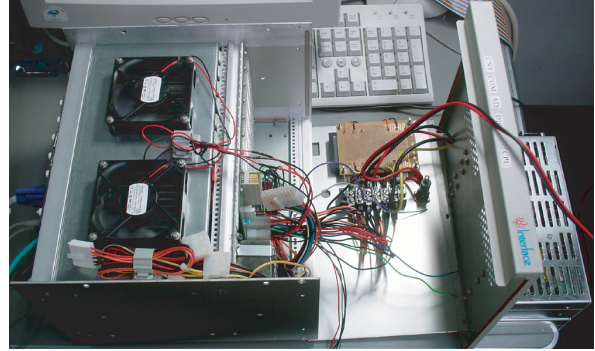
(c) 充電器と充電口

図 A.2: 「東大カドウェル号」の構成～その1～

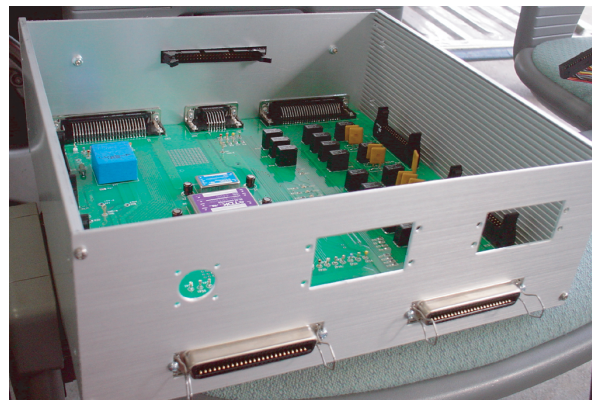
A.1. 「東大カドウェル号」の製作年表



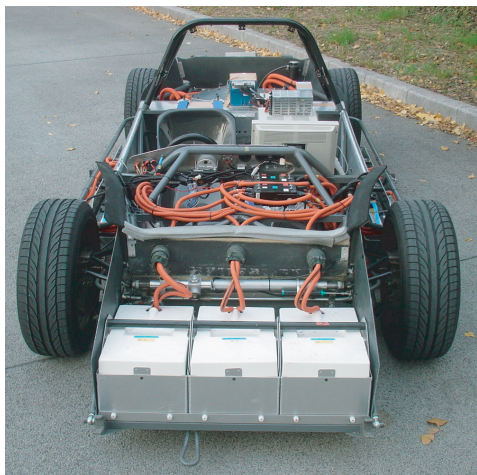
(d) 車両制御PC



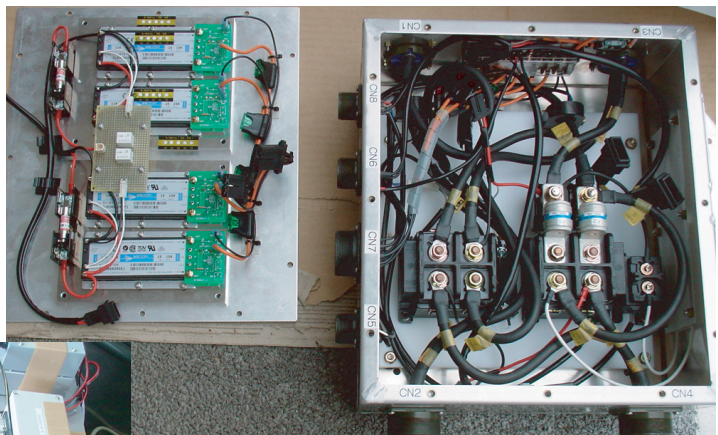
(e) 車両制御PCの電源系



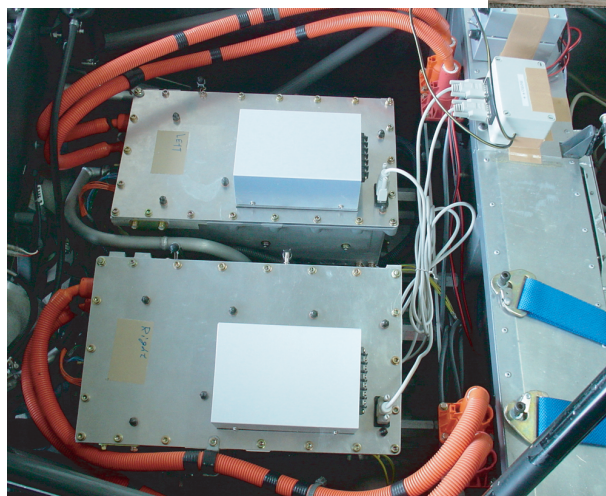
(g) インターフェイスボックス



(f) 車体前部に搭載
のバッテリー



(h) ジャンクションボックス

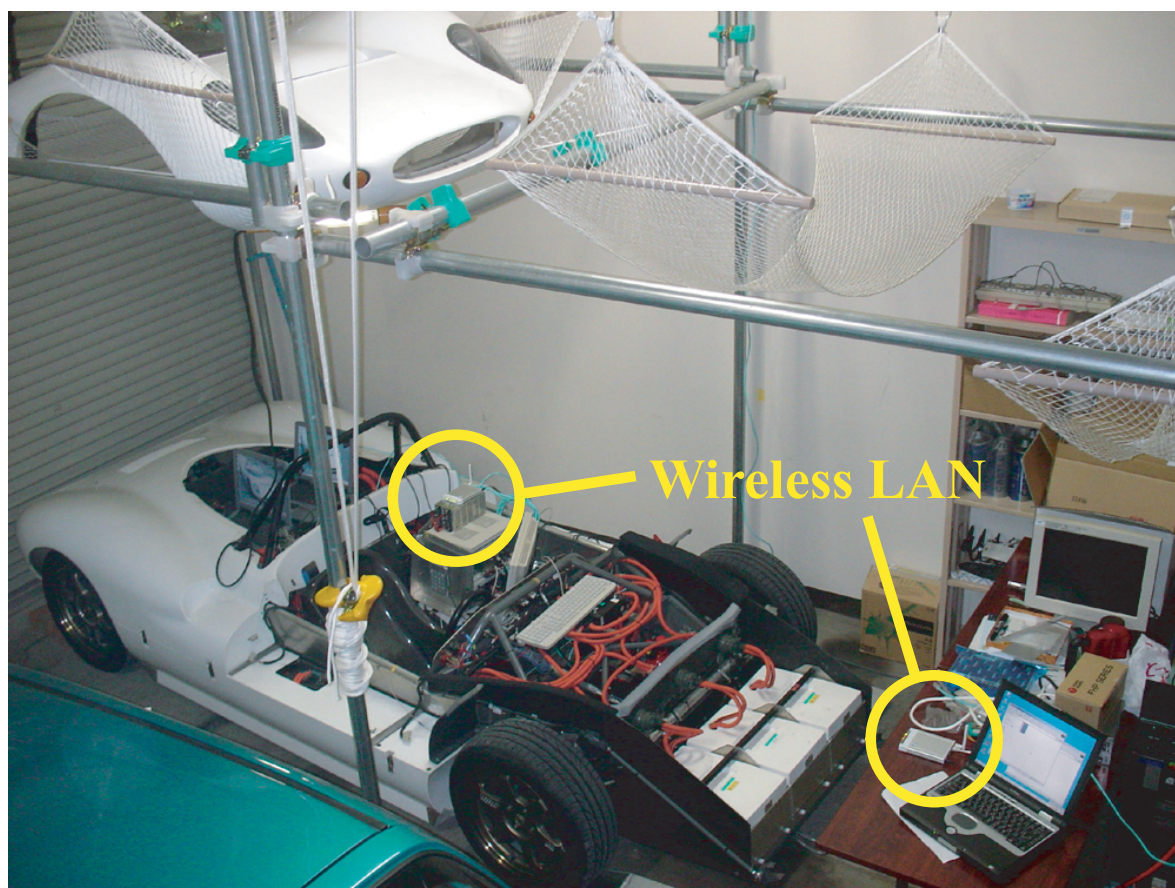


(i) 第3期改造で搭載したDAボード



(j) テストコースへ輸送中

図 A.3: 「東大カドウェル号」の構成～その2～



(k) カウル置き場とリモートコントロールシステムの調整の様子

図 A.4: 「東大カドウェル号」の構成～その3～

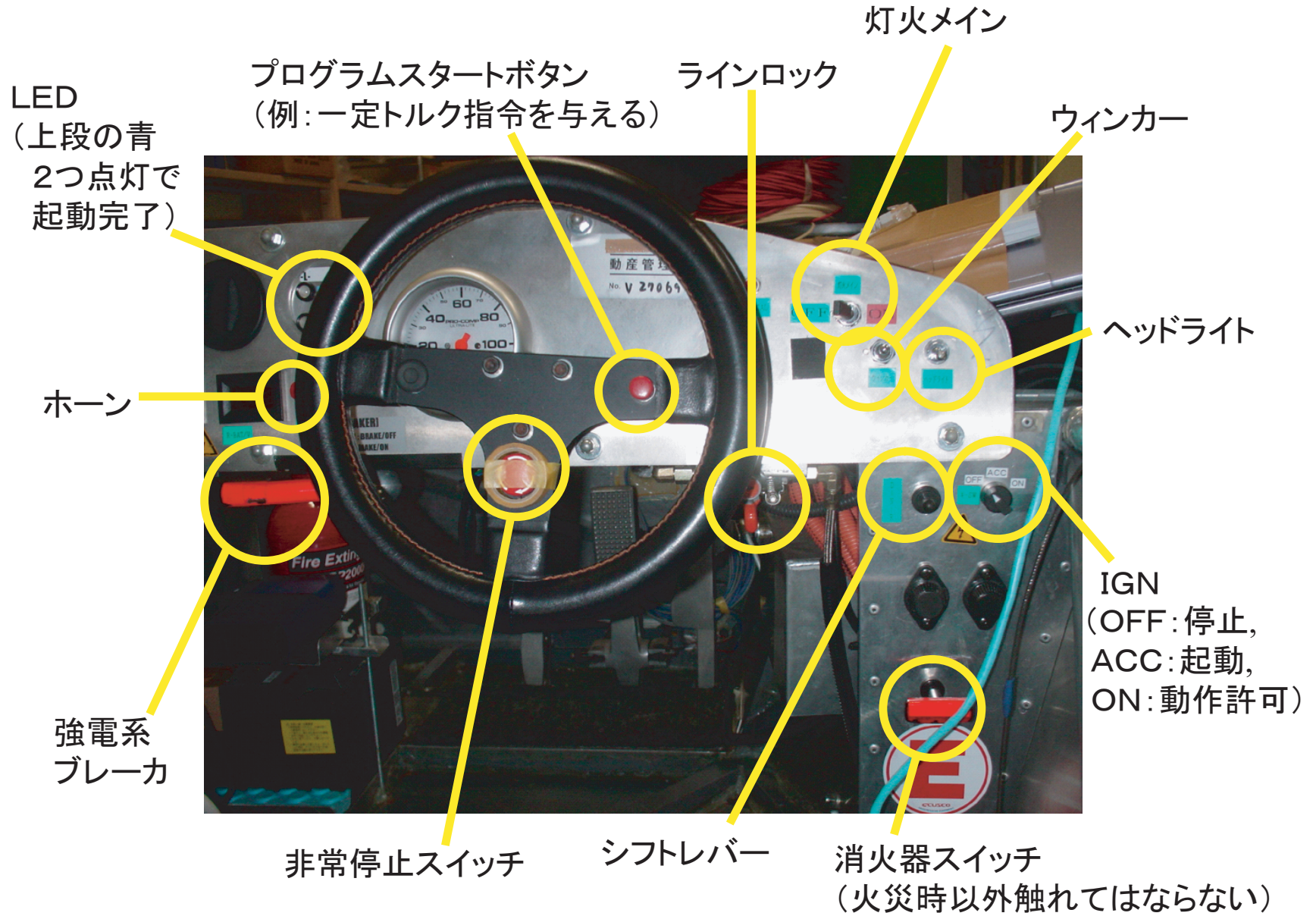


図 A.5: 「東大カドゥエル号」のコックピット

A.2 「東大カドウェル号」簡易操作マニュアル

以下に，簡易操作マニュアルを示す．

1. リモートコントロールPCを用意し，無線LANにより車内ネットワークに接続する．緊急移動の場合は，モニタPCで代用可能．
2. 車両制御PCの電源コネクタを接続する．
3. 強電系ブレーカを入れる．
4. 車両制御PCが起動したら，リモートコントロールPCからログイン（user：horilab, pass：horilab）．ART-Linuxとグラフィックボードの相性問題により，メンテナンス以外での車両制御PCへの直接ログインは禁止．
5. root権限を取得し，/cadwell/progにあるプログラムを実行する（./shiroev）．リターンキーを押すように画面に表示されるので押す．
6. IGNを起動状態（ACC）にし，起動完了の青色LEDが点灯するのを待つ．
7. IGNを動作許可状態（START）にし，シフトチェンジしてアクセル踏めば動作可能．
8. 終了する時は，車両制御PCをシャットダウンした後，電源コネクタを外し，強電系ブレーカを切る．