

研究解説

電気と制御で走る近未来車両の研究

Research on Future Vehicle driven by Electricity and Control

堀 洋 一*

Yoichi HORI

1. 電気自動車の特長

電気自動車 (EV) はモータで動くのだから、モータの特長を生かさなければ意味がない。モータの最大の特長は、

トルク応答がエンジンの2ケタ速い

ことである。エンジンが500 msとすればモータは5 msである。アクチュエータの遅れが短いから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) を変えることなく、車輪がスリップしたときのトルクの垂下特性 (外乱応答) だけを調整したりできるようになる。これを2自由度制御という。つぎに、

発生トルクが正確に把握できる

という点で、これをいかせば、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が簡単にできるようになる。この情報は直ちにトラクションコントロールに用いることができるし、ドライバに「今すべりやすい路面に入りました」などという警告を出すことも可能になる。さらに、

モータは分散配置してもコスト高にならない

ので、4輪独立駆動にすれば、ヨーレート力そのものを制御入力とする新しい制御系が組め、ガソリン車にはできない高度な運動制御が可能になる。エンジンを4個使うことは非常識でも電気モータなら可能であろう。

このような、電気と制御の世界にこそ、電気自動車ならではの魅力が存在する。遠からず人々はこの魅力に気がつき、電気自動車といえば高性能制御車という時代がやってくるであろう。

2. 電気モータのトルク速度特性

図1は、よく引き合いに出される「乗物に適した速度・トルク特性」である。モータには定トルク領域と定出力領域があることはよく知られているが、タイヤがすべったときの挙動のような速い現象は、定トルク曲線と定出力曲線に沿って変化するわけではない。ある動作点で微小な速度変化が生じたとき、トルクがどう応答するかを2種類描き

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

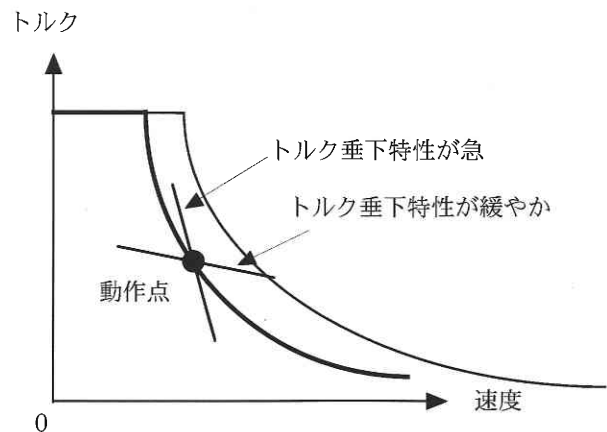


図1 電気モータの速度・トルク特性
(このような図では過渡的性質は表現できない)

込んでみた。

アクセルペダルの踏み込み角度に比例するトルク制御を行うと、車輪がスリップしてモータ速度が増加しても、トルクはほとんど変化しないのでスリップはさらに増大する。一方、電圧が短時間ではあまり変わらないような制御を行うと、小さな速度増加に対してトルクは急激な垂下特性を示し、タイヤは非常にすべりやすくなる。

このような、タイヤの空転に対する応答は、ドライバの指令に対する応答とはまったく別物である。別の言い方をすれば、モータの過渡特性は、図1のような準静的な速度・トルク特性曲線では表現することはできない。静的な特性や効率マップだけでモータの良し悪しを比較していると、落とし穴にはまってしまう。

3. 東大三月号Iの研究

3.1 東大三月号I

電気自動車の積極的な優位性に光を当て、真の実用化に向けた問題点の洗い出しと解決を行う、という意気込みをもって、東大三月号Iを製作した。種車はニッサンマーチである。理論やシミュレーションでは弱く、要するに作って走らせないと説得力がない。また、大学における電気自動車研究のパラダイムと研究拠点を構築することも副次的



図 2 東大三月号 I

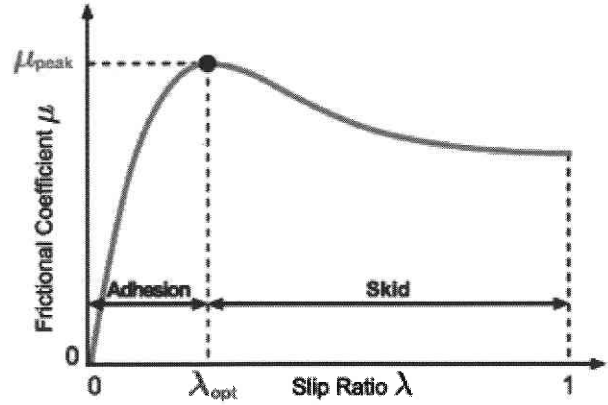


図 5 μ-λ 曲線

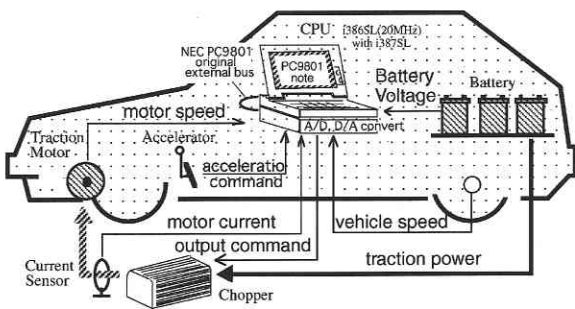


図 3 東大三月号 I の制御系構成

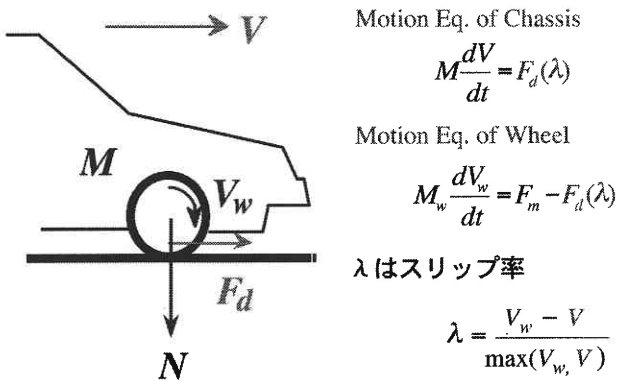


図 4 車輪回りの運動方程式

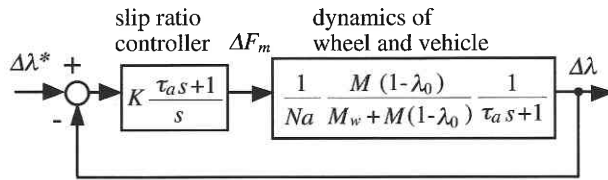


図 6 スリップ率制御系

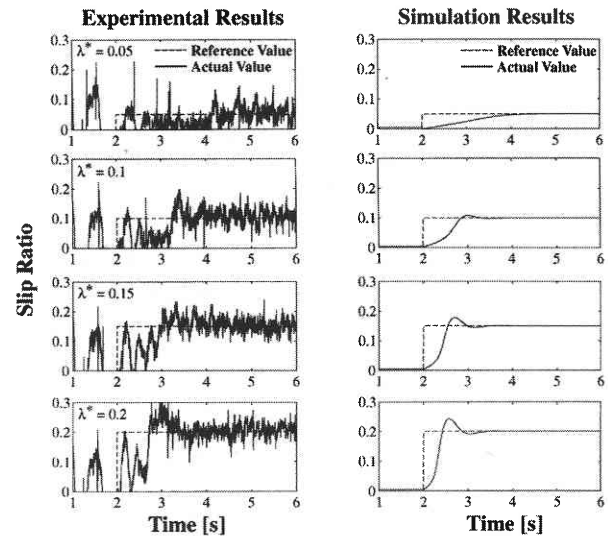


図 7 スリップ率制御のシミュレーションおよび実験結果

な目的とした。

3.2 車輪のスリップ防止制御

自動車の加速時にスリップを抑制する制御をトラクションコントロール、ブレーキ時のものを ABS (Anti-lock Braking System) という。トラクションコントロールはガソリン車では困難であるが、トルク応答の速い電気自動車では容易に実現可能である。しかも加速減速の別なく連続的なトルクを発生できる点も見逃さない。

(1) スリップ率制御

図 4 においてスリップ率 λ とは、車体速度 V と車輪速度 V_w の差の相対比であり、図 5 に示すように、λ = 0 が完全粘着、λ = 1 が完全空転を意味する。

スリップ率制御とはこの λ を直接制御する非常に強いフィードバック制御であり、図 6 のような可変ゲインの PI 制御器を用いて実現される。図 7 に東大三月号 I を用いた実験結果を示す。λ = 0.3 のような不安定なスリップ率の領域でも、良好に制御できていることがわかる。

(2) 車輪速度のみの制御による空転抑制

スリップ率制御の問題点は、車体速度の検出が難しい点である。車体センサは高価であり、非駆動輪の速度は旋回中には車体速度を表さず、また 4 輪同時制動もできない。そこで、車輪速度のみを用いた制御は重要である。たとえば、図 8 に示すモデル追従制御 (MFC) により空転を抑制することができる。すべりやすい路面に入ると出る走行

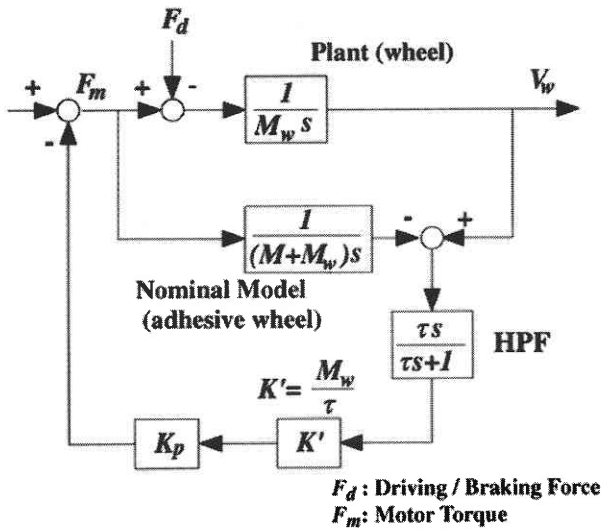


図8 MFC (モデル追従制御)

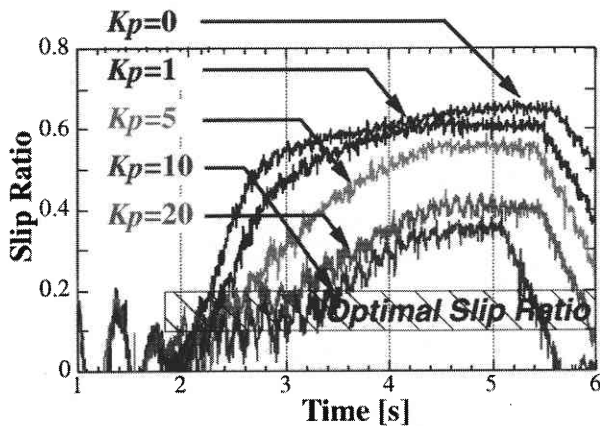


図9 MFCの実験結果

実験の結果を図9に示す。

完全に空転が防止できるわけではないが、過渡的な空転の発生を抑制する効果が確認される。この制御は、空転時にタイヤ慣性を重く見せかける制御であり、速いマイナー制御ループによって初めて得られる効果である。

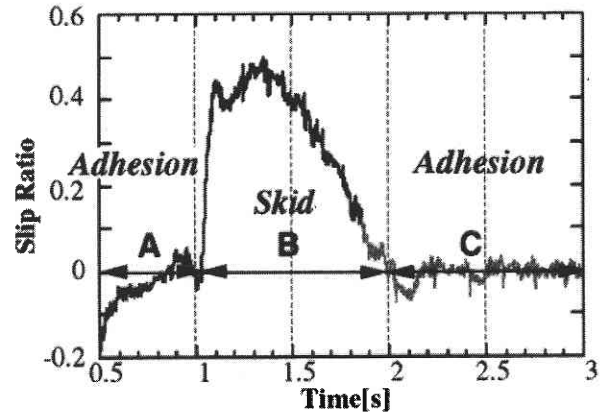
(3) 車体速度を用いない空転検出

モータの出力トルクの値は正確に把握できるが、油圧ブレーキやエンジンでは難しい。ここにも電気自動車の新しい可能性がある。その好例が、モータのトルクと速度のみから空転の発生を検出する手法である。自分の出しているトルクから予想される加速がなされていればタイヤはずべていないが、そうでなければずべているはずだ、という原理を使う。

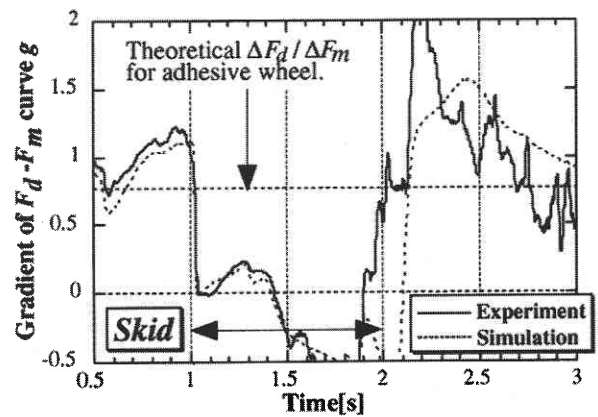
図10に実験結果を示す。(a)に示す空転の発生を(b)のように検出することができ、この検出値を用いた空転防止制御にも成功している。

3.3 路面状態推定とその応用

ABSやDYCなどを効果的かつ安全に適用するためには、路面のすべりやすさを制御器が把握していることが重



(a) 空転現象 (車速を用いて測定)



(b) 車速を用いない空転検出結果
図10 車速を用いない空転検出の実験

要である。また、ドライバーに対して路面状態を表示できれば、安全性向上の面でも大きな意義がある。この点電気自動車は、モータトルクが正確に把握できるため有利である。

(1) μ 勾配推定

路面状態を推定し制御に利用するためには、いま μ - λ 曲線のどの部分にいるのかを実時間で推定できなければならない。その一例が μ 勾配の推定である。

そのためには、路面とタイヤ間の制駆動力を知る必要がある。電気自動車ではモータトルクが把握可能であるから、容易にオブザーバを構成することができる。これを駆動力オブザーバと呼び、構成は図11に示すとおりである。あとは、一般的な逐次最小二乗法、固定トレース法などの適応同定の手法を用いればよい。

μ 勾配推定の実験結果を図12に示す。乾燥アスファルト上で、1.5s付近において急発進したためにスリップが生じている。スリップ率の急激な上昇に対応して、状態が μ - λ 曲線上を左から右に移動してピークを越え、傾きが負の領域に至ったことを示している。続いて再粘着に従い推定値は負から正と変化している。また、固定トレース法の方がより安定した推定を行っていることなどもわかる。

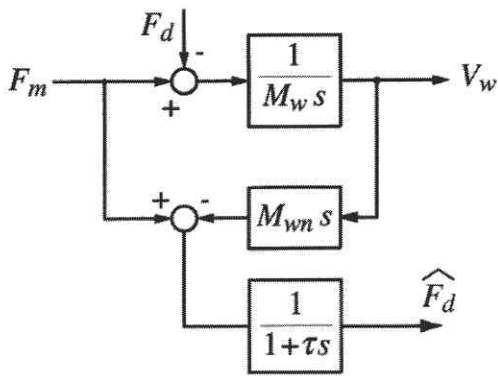
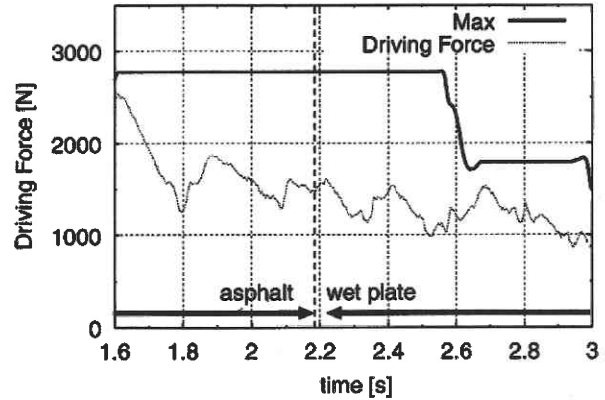


図11 駆動力オブザーバ



(a) 最大駆動力推定値

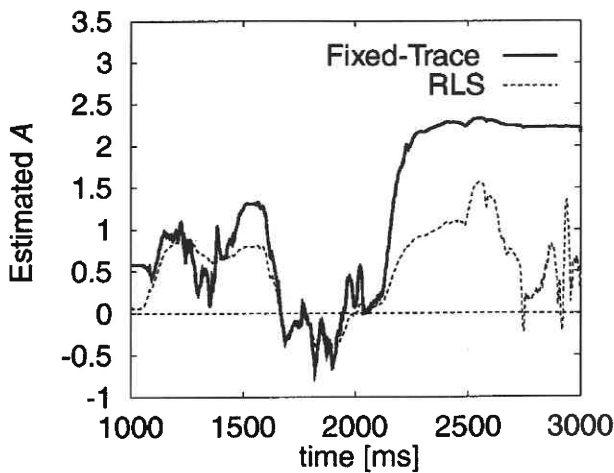
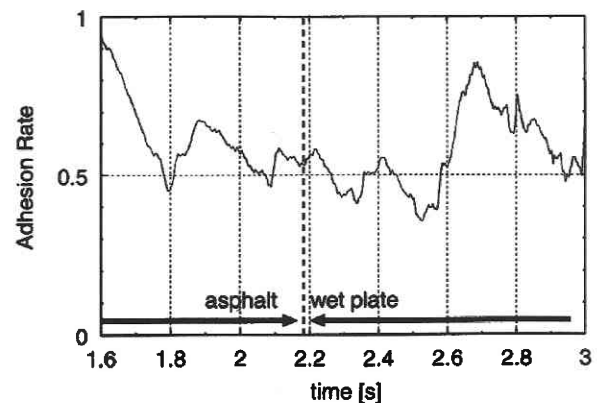


図12 μ 勾配の推定結果 (Aは μ 勾配)



(b) 粘着利用率

図13 路面が急変する場合の粘着利用率の変化

(2) 最大摩擦係数の推定

さらに積極的な路面状態推定法として、路面摩擦関数のピーク値の推定がある。通常の運転をしている状態で、ドライバに「いま凍った路面に入りました」などと警告することが可能になる。タイヤの粘着利用率を「最大制駆動力」に対する「実際の制駆動力」の割合と定義する。これが1に近ければタイヤの能力は限界に近いことになる。

図13に東大三月号Iを用いた実験結果を示す。乾燥アスファルト路面を定常走行中に、2.2s付近で急に濡れた鉄板に入る。この路面変化は2.6s付近で最大摩擦係数の減少として検出され、結果として粘着利用率が0.8程度まで急増している。このような路面状況の急変はドライバには検知しにくい。その情報を警告できれば、安全性向上に大きく寄与できると考えられる。

4. 東大三月号IIの研究

4.1 東大三月号II

図14は新しく製作した東大三月号IIで、4つの車輪に配したインホイールモータによって4輪完全独立駆動を行うことができる。また図15は、実現しようとしているモー

ション制御系のブロック図である。

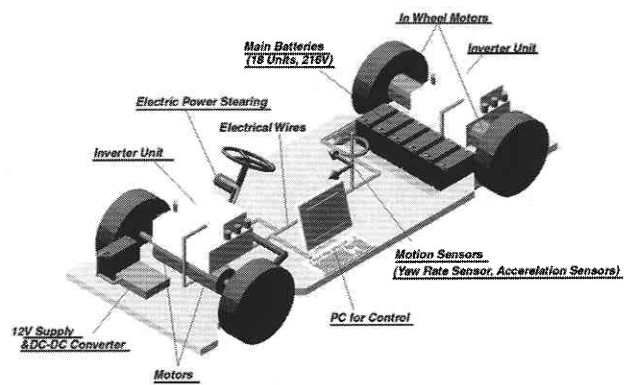
三月号の研究成果が広く用いられるようになれば、スリップ等の危険性が格段に少なくなることはもちろん、すべりやすい路面でも高度な姿勢制御によって安全性は大きく向上する。より損失の少ないタイヤを用いれば、一充電走行距離を飛躍的に伸ばすことができる。機械ブレーキは非常用とし、電気ブレーキを常用すれば、エレベータのようななめらかな加減速も可能になる。

車体のダイナミクスは、車両速度 (v)、車体すべり角 (β)、ヨーレート (γ) を状態変数とする非線形状態方程式によって表現することができるが、一般には、車両速度を一定と仮定した線形状態方程式を用いて、諸種の姿勢安定化制御を考えることができる。

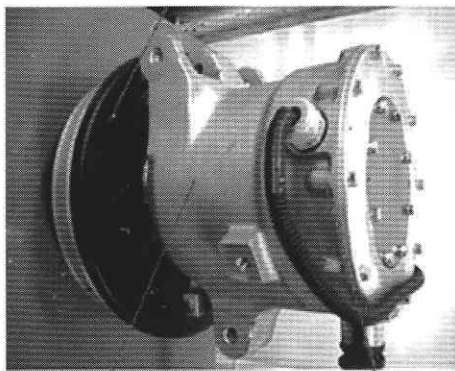
図15の上の段は基本的にフィードフォワード制御や遅いフィードバック制御である。たとえば、望みの車両特性を実現する車体すべり角やヨーレートの指令生成や、それを実現する姿勢制御系であり、従来のガソリン車でもよく研究されている。「動的駆動力配分制御」と記した部分は、横力を時々刻々推定しながら、横力の小さいタイヤに大きな制駆動力を分担させることによりタイヤの発生力を均一化する手法で、4輪駆動EV特有の手法である。



(a) 外観



(b) 制御システムの概要



モータと減速ギア ロータリーエコーダ

(c) インホイールモータ (これを4個各車輪に用いる)
図14 東大三月号II

しかし、電気自動車の速くて正確なトルク発生を最もよく利用できるのは、一番内側のマイナー制御ループとして作り込まれる増粘着制御であり、「1軸における特性改善のための諸方策」と記した部分である。具体的には、MFCや最適スリップ率制御など、ガソリン車には絶対まねのできない制御で、電気自動車特有の部分となる。

4.2 2次元姿勢制御

電気モータは小型化が可能であるので分散配置することができ、左右輪に異なるトルクを与えて車両姿勢を制御す

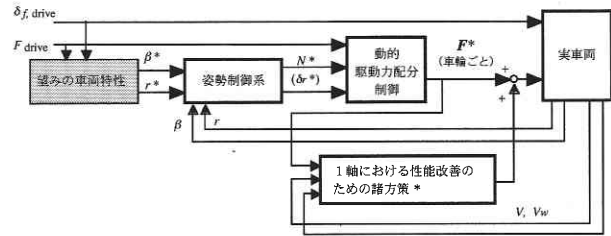


図15 東大三月号IIで実現するモーション制御系

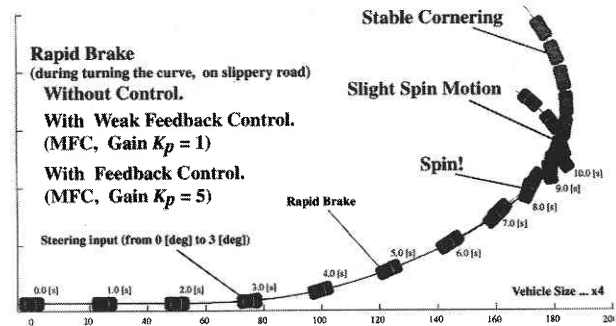


図16 DYCにおけるMFCマイナー制御の効果 (シミュレーション)

るいわゆるDYCが容易に実現可能である。

DYCは従来車においても盛んに研究され、操舵応答性の改善と旋回挙動の安定化が可能であることが知られている。しかし、ガソリン車では特殊なギアやブレーキを用いてトルク配分比を変えたりステアリングを併用するしかない。電気自動車ではモータを分散配置することによって、より直接的な制御性の向上が期待できる。

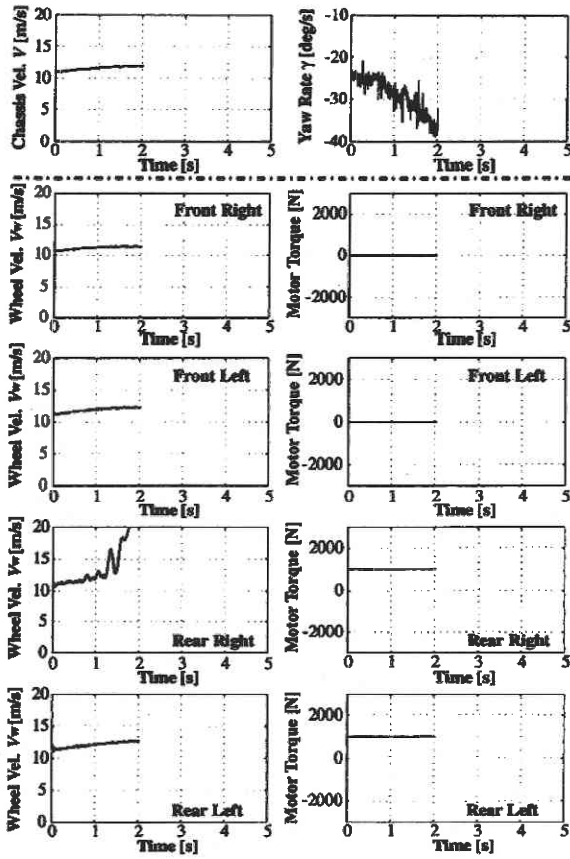
図15に示したように、車両の2次元的な運動制御においては、ドライバーの指令するステアリング角からヨーレート γ への線形性(操舵安定性)と、車体の向いている方向と車体速度のなす方向のつくる角度である車体すべり角 β の安定化制御が重要である。これを実現するためには、路面や車両に関する複雑な推定機構を必要とする。

しかし、4輪のモータに前述のMFCを適用しておくだけでも、旋回制動時の安定性を向上できることが確かめられている(図16)。これは、高速なマイナーループの付加によって、乗り物に適した車輪を作っておくことによって、無意識のうちに車両運動が安定化されるということであり、従来車とは考え方も手法も全く異なる。

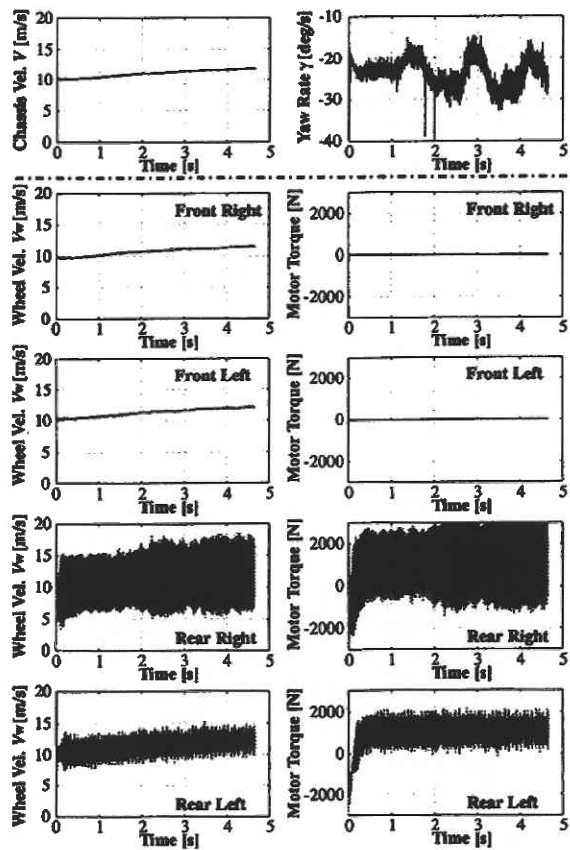
図17は東大三月号IIで得た実験結果である。(a)はとくに制御を行っていない場合の旋回特性を示したもので、ヨーレート(γ)が不安定に増大し発散している様子が見てとれる。一方(b)は後輪2輪にMFCを施した結果で、良好な旋回特性を実現できている。

4.3 車体すべり角 β の推定

ヨーレート γ と車体すべり角 β のうち、 γ はセンサを用いて容易に測定可能であるが、 β を直接測定することはきわめて困難であって、オブザーバを用いて推定するしか



(a) 制御を行わない場合



(b) 後輪 2 輪に MPC を施した場合

図 17 東大三月号 II の旋回実験

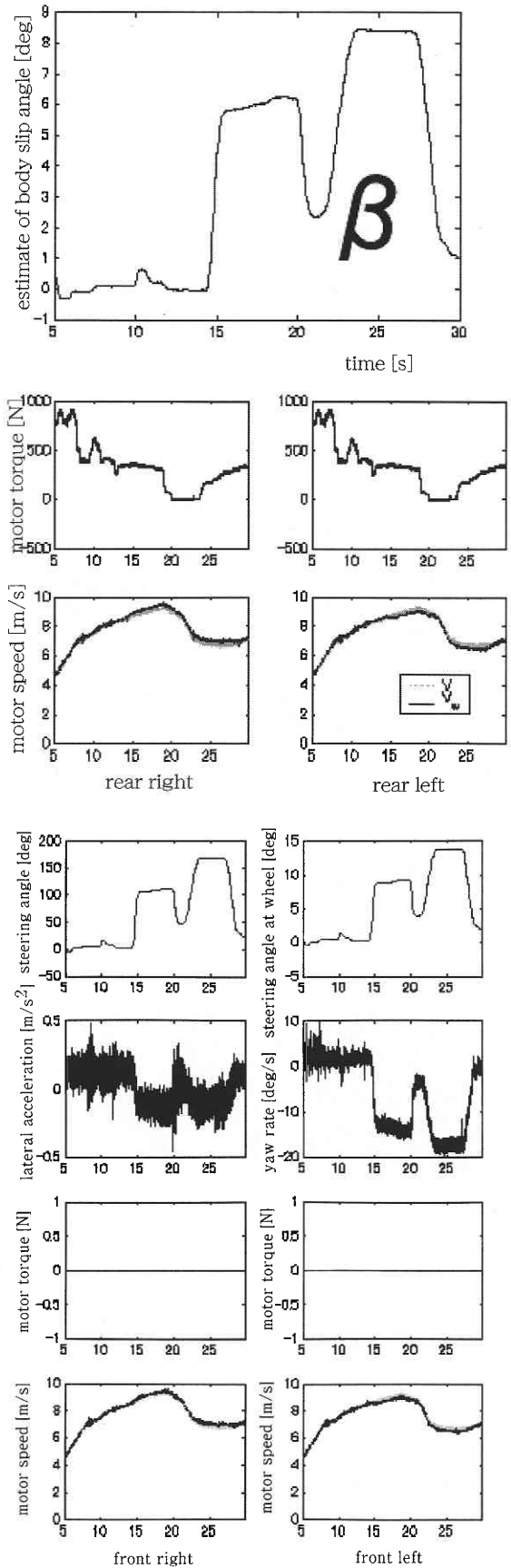


図 18 車体すべり角 β の推定実験結果

い。ここでは、 γ と β を状態変数とする 2 輪モデルを用い、横方向の加速度 a_y を測定変数に加えた線形オブザーバを設計し、東大三月号 II を用いた実験結果を図 18 に示す。

β の真値を測定できていないので即断はできないが、図 18 の β の推定値はビデオなどから推測できる実際の車両挙動をよくとらえており、より高度な姿勢制御に十分用いることが可能であると考えている。

5. あとがき

「電気と制御で走る近未来車両の研究」と題して補助を受けた展開研究に関連し、堀研究室の電気自動車研究の現在までの成果について紹介した。堀研が生産技術研究所に引っ越したのは 2002 年 10 月であり、この原稿を書いている段階で、1 年 2 ヶ月が経過した。補助を受けた費用の多くは、専用ガレージや実験設備の整備に費やした。狭隘な本郷キャンパスでの研究環境に比べれば天と地の差があり、大変感謝している。3 台目の電気自動車がまもなく完成予定である。さらに本質的なモータ特性の内側に入り込んだ新しい粘着特性の実現をもくろんでいる。

世界中がオートショーという名の展示会を開催する中で、おそらく日本だけがモーターショーと名乗ってきた。自動車業界は知ってか知らずか、未来の車は「電気」で走

るようになり、東京モーターショーが、文字通りモータの技術を競う場になることを物語っている。電気モータの本質は「制御」である。もし車が電気で走るなら、制御の世界にこそ、おもしろさも成功の鍵もあると考えている。

(2003 年 12 月 24 日受理)

参 考 文 献

- 1) 堀 洋一, 坂井真一郎, 電気自動車の新しい制御技術, 自動車技術会シンポジウム (未来に向かう電気自動車技術), 1998. 3
- 2) 堀 洋一, 「家田 仁編著, それは足からはじまった (モビリティの科学)」, 1.5 電気モータのしくみ, 5.3 電気自動車の将来性, 技報堂出版, 2000. 6
- 3) 堀 洋一, 坂井真一郎, 片岡寛暁, 電気自動車の新しいモーションコントロール (解説), システム/制御/情報, Vol. 45, No. 5, pp. 231-239, 2001. 5
- 4) Yoichi Hori, Future Vehicle driven by Electricity and Control-Research on 4 Wheel Motored 'UOT March II', Proc. of IEEE-AMC 2002, invited paper, pp. 1-14, 2002. 7, Maribor
- 5) 堀 洋一, 寺谷達夫, 正木良三, 自動車用モータ技術, 日刊工業新聞社, 2003
- 6) Tomoko Inoue and Yoichi Hori, Observer Design of Body Slip Angle β for Future Vehicle Control and Experimental Evaluation using the Four-Motored Electric Vehicle on Professional Test Course, Proc. of EVS-20, 2003. 11, Long Beach