

電 気 と 制 御 で 走 る 近 未 来 車 両 に 関 す る 研 究

東 京 大 学 生 産 技 術 研 究 所 第 3 部

堀 洋 一

Research on Future Vehicle driven by Electricity and Control

Yoichi Hori

University of Tokyo, Institute of Industrial Science

As an electric vehicle is driven by electric motors, it has following three remarkable advantages: (1) Motor torque generation is fast and accurate, (2) Motors can be installed in each wheels, and (3) Motor torque can be known precisely. These advantages enable us easily to realize (1) High performance ABS and TCS with minor feedback control at each wheel, (2) Chassis motion control like DYC, and, (3) Estimation of road surface condition. "UOT Electric March I and II" are our experimental EVs. March II is driven by four in-wheel motors and was made for intensive study of advanced motion control of electric vehicle, which can be firstly realized by electric vehicle.

1. 電気自動車の特長

EV（電気自動車）が ICV（内燃機関自動車）と大きく異なる点は、当たり前であるが、EV は電気モータで動くということであり、その特長を活かさないほとんど意味がない。電気モータには次に述べる 3 つの特長がある。

トルク応答がエンジンの 2 ケタ速い

電気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 500ms だとすると、モータは 5ms である。このことは意外と認識されていないが、これを活かさなければ EV のメリットはほとんどない。逆に、電気モータの高速で正確なトルク応答を活用することによって、EV にはバラ色の未来が開けるだろう。

そもそも車は平行移動であるから原理的にエネルギーは不要である。ロスのお大半はタイヤ路面間の摩擦が原因である。鉄道のエネルギー効率が格段によいのは、摩擦のきわめて少ない鉄車輪と鉄レールを使うためである。ただし鉄車輪と鉄レールはよくすべる。従って、電気鉄道にはモータによる粘着制御が不可欠であり、そうやって初めてまともに走っているのである。車輪とレールの粘着特性がモータの種類や制御方式によって異なる（たとえば、まったく同じモータを使っても、直流機関車よりも交流機関車の方がたくさんの貨車を引っ張ることができる）ことはよく知られている。

モータの応答は速すぎるので、無用であるばかりか人間特性との調和を妨げるといふ人がいる。しかしこの理屈は半分間違っている。制御系には目標値応答特性と外乱応答特性（閉ループ特性）とがあり、両者は異なる。簡単にいえば、人間を含んで論じるべき目標値応答と、その必要のないタ

イヤのすべりなどに対する外乱応答とは別物である。しかも両者はほぼ独立に設計可能であることも、2 自由度制御という制御工学の基礎知識である。

いままでの EV は、ガソリン車の代替が念頭にある。そのため、定常的な速度・トルク特性や効率マップだけがエンジンと比較される。EV のエネルギー効率は決してよくないのである。発想を変え、土俵を変えて戦わないとほとんど勝ち目は無い。

発生トルクが正確に把握できる

電気モータは発生トルクを正確に把握できる。エンジンはトルク発生機構に多くの非線形性を含み、モデルを正確に記述することは難しく、発生トルクを正確に把握することはできない。電気モータは電流を観測すれば、発生トルクを正確かつ容易に把握できる。すると、駆動力オブザーバという簡単な演算を用いることによって、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、リアルタイムで路面状態を推定することが可能となる。たとえば車が雪道に入れば、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。このことは後ほど実験結果を示す。

モータは分散配置してもコスト高にならない

電気モータの高い制御性を活かせば、ガソリン車にはできない高度な運動制御が可能になる。前後方向の運動を対象としたウルトラ ABS やトラクション制御、横方向の運動も考えたヨーレートやすべり角制御が考えられる。前者の代表は ABS であり、ガソリン車においても比較的応答の速いブレーキシステムを利用して実現されている。しか

しトラクション制御は付加ハードが必要でコスト高となり、性能も不十分である。EVであれば、モータ制御だけで高性能なトラクション制御が簡単に実現できる。

4輪独立駆動にすればヨーレートそのものを制御入力とする新しい制御系が組める。電気自動車の4輪独立駆動は、ステアリングによって横方向の力を発生せざるをえない従来の4WDや4WSとは本質的に異なる。モータは分散配置してもコストはそれほど高くない。小型エンジンを4個使うことは非常識でも、電気モータなら多分許されると思われる。

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、定トルク曲線や定出力曲線に沿って変化するわけではない。図には、ある動作点で微少な速度変化が生じたとき、トルクがどう応答するかを2種類描き込んでみた。

アクセルペダルの踏み込み角度に比例させて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にくくなる。

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のである。

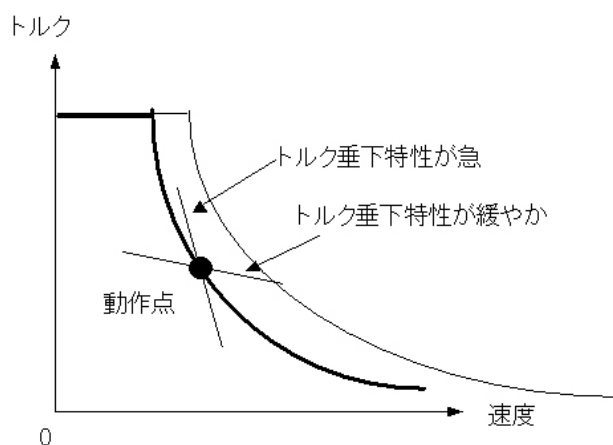


図1 電気モータの速度・トルク特性 (このような図では過渡的性質は表現できない)
Fig.1. Torque-speed property of electric motor.(Transient cannot be explained by this figure.)



図2 東大三月号 I
Fig.2. Photo of "UOT March I".

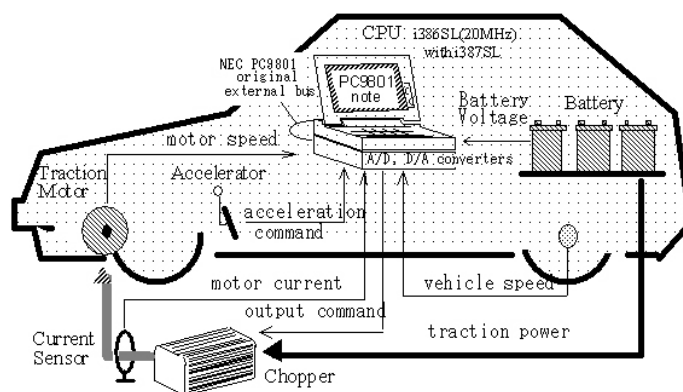


図3 東大三月号 I の制御系構成
Fig.3. Control system of "UOT March I".

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り、東大弥生キャンパスの総合試験所で製作したことも名前の由来である。何かを主張するには理論やシミュレーションでは弱く、実車を作って走らせないと説得力がない。

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せない。

(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、 $\lambda=0$ が完全粘着、 $\lambda=1$ 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。 $\lambda=0.3$ 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。

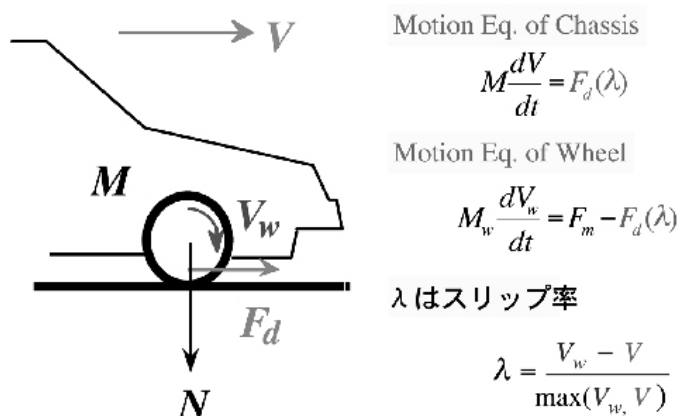


図4 車輪回りの運動方程式
Fig.4. Kinetic equations around a wheel.

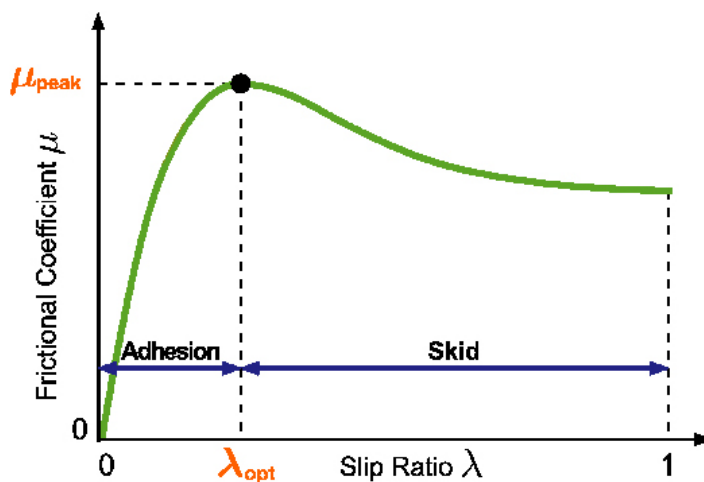


図5 $\mu - \lambda$ 曲線
Fig.5. $\mu - \lambda$ curve.

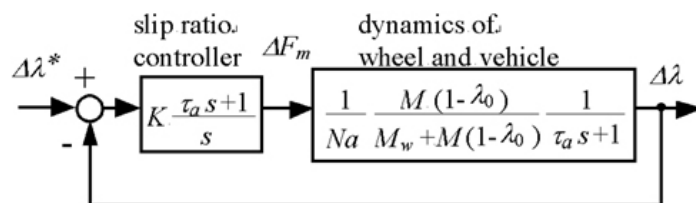


図6 スリップ率制御系
Fig.6. Slip ratio control (SRC).

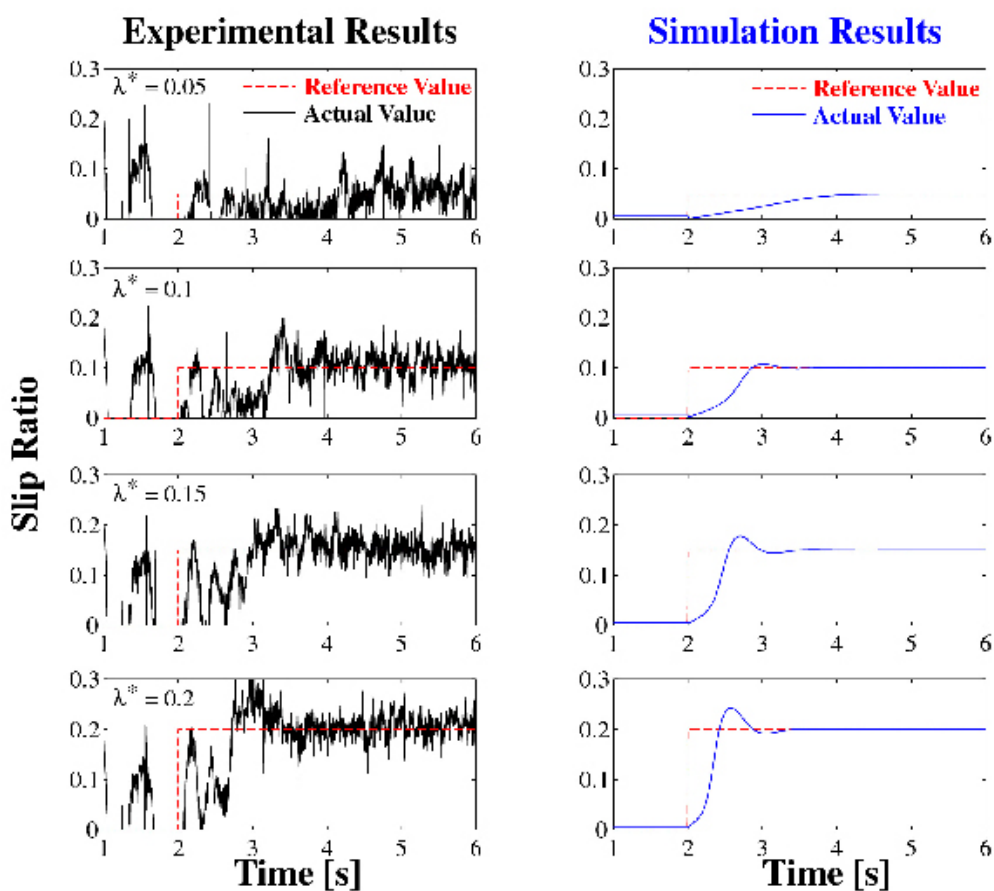


図7 スリップ率制御のシミュレーションおよび実験結果
Fig.7. Simulation and experimental results of SRC.

(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って出る走行実験の結果を図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。

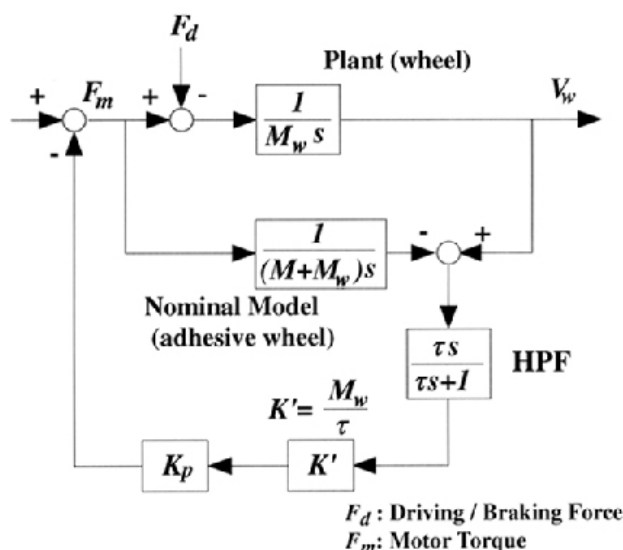


図8 モデル追従制御 (MFC)
 Fig.8. Model following control (MFC).

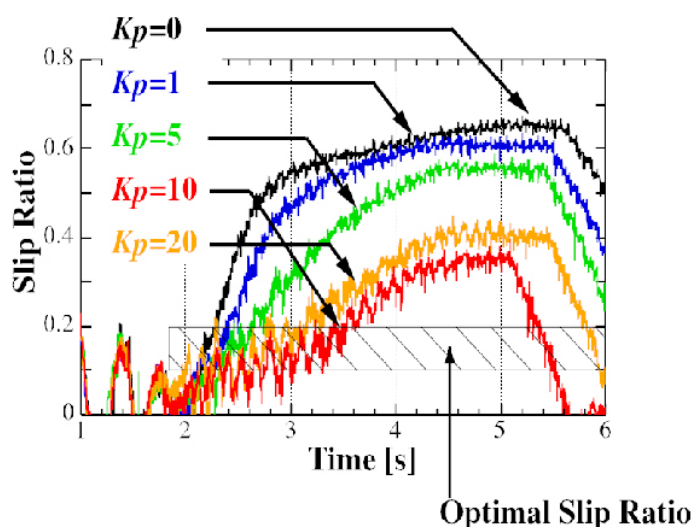


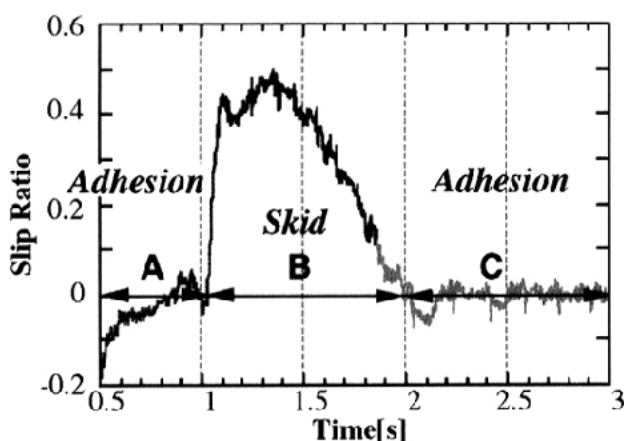
図9 MFCの実験結果
 Fig.9. Experimental results of MFC.

(3) 車体速度を用いない空転検出

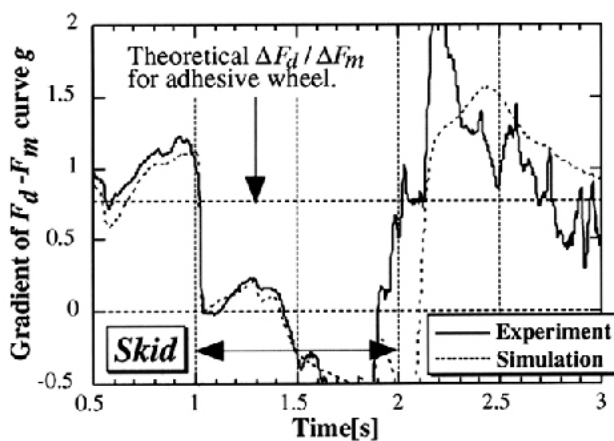
モータの出力トルクの値は正確に把握できるが、油圧ブレーキやエンジンでは難しい。ここにも電気自動車の新しい可能性がある。その好例が、モータのトルクと速度のみから空転の発生を検出する手法である。自分の出しているトルクから予想される加

速がなされていけばタイヤはすべっていないが、そうでなければすべっているはずだ、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る。この検出値を用いた空転防止制御にも成功している。



(a) 空転現象 (車速を用いて測定)
 (a) Skid detection based on measured vehicle speed.



(b) 車速を用いない空転検出結果
 (b) Skid detection based on estimation.

図 10 車速を用いない空転検出の実験
 Fig.10. Experiment of wheel skid detection method without vehicle speed.

3. 3 路面状態推定とその応用

ABS や DYC など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要である。また、ドライバ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。

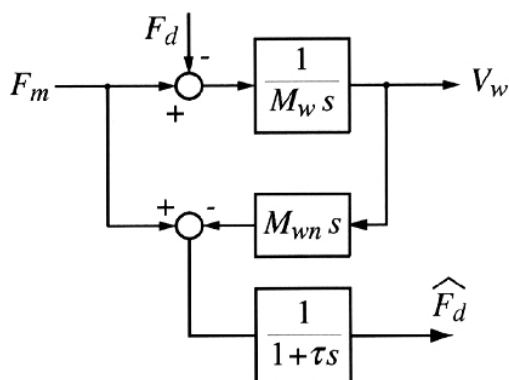


図 11 駆動力オブザーバ
Fig.11. Driving force observer.

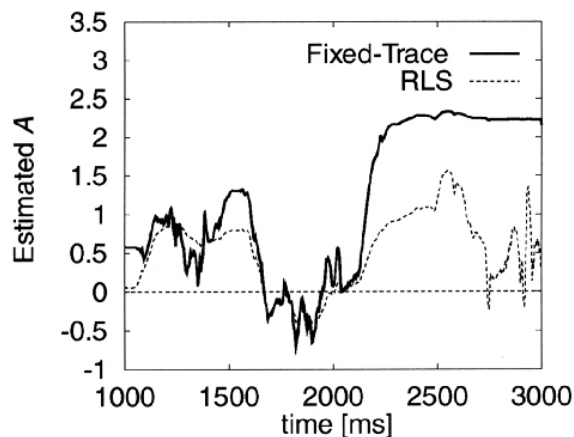
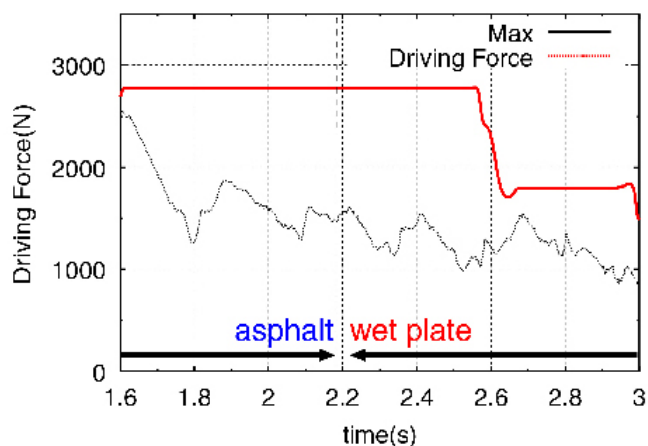


図 12 μ 勾配の推定結果 (A は μ 勾配)
Fig.12. Estimation result of μ gradient (A).

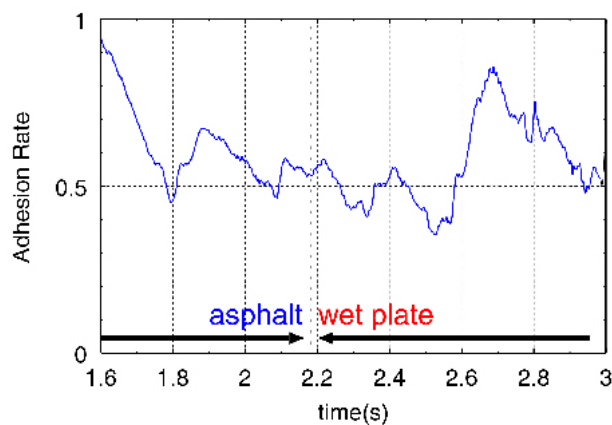
(2) 最大摩擦係数の推定

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に近づけばタイヤの能力は限界に近いことになる。



(a) 最大駆動力推定値
(a) Estimation of the maximum driving force.



(b) 粘着利用率
(b) Adhesion ratio.

図13 路面が急変する場合の粘着利用率の変化
Fig.13. Detection of the adhesion ratio with rapid change of road condition.

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。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。

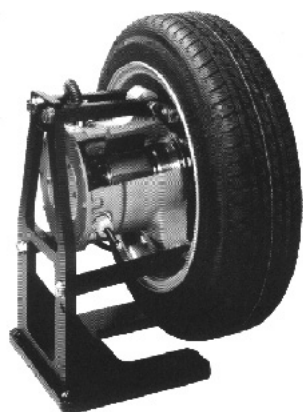
車体のダイナミクスは、車両速度 (V)、車体すべり角 (β)、ヨーレート (γ) を状態変数とする非線形状態方程式によって表現することができるが、一般には、車両速度を一定と仮定した線形状態方程式を用いて、諸種の姿勢安定化制御を考えることができる。

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。

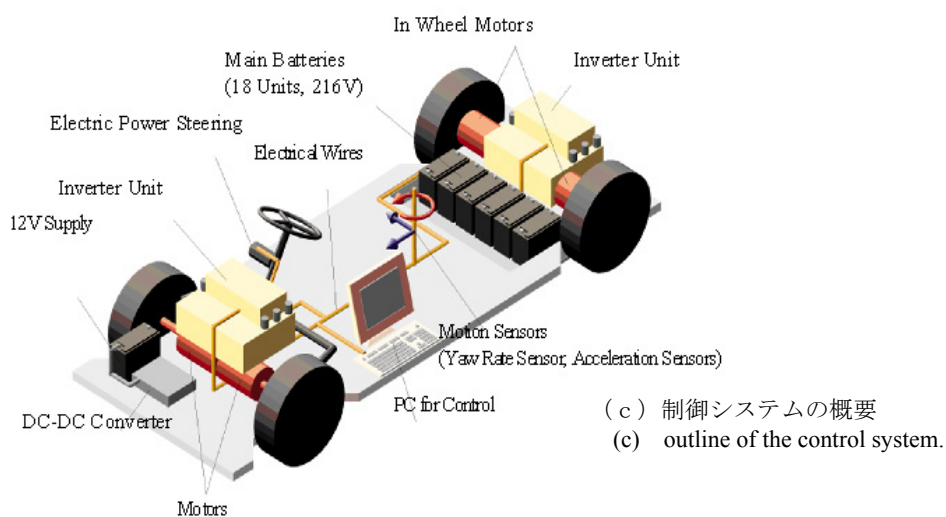
しかし、電気自動車の速くて正確なトルク発生を最もよく利用できるのは、一番内側のマイナー制御ループとして作り込まれる増粘着制御であり、「1 軸における特性改善のための諸方策」と記した部分である。具体的には、MFC や最適スリップ率制御など、ガソリン車には絶対にまねのできない制御で、電気自動車特有の部分となる。



(a) 外観
(a) photo clip



(b) インホイールモータ (これを4個各車輪に用いる)
(b) inwheel motor for each wheel



(c) 制御システムの概要
(c) outline of the control system.

図 14 東大三月号 II
Fig.14. UOT March II.

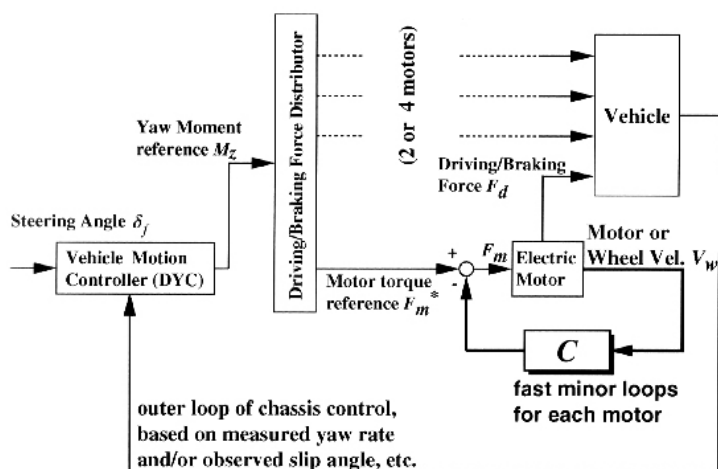


図 15 東大三月号 II で実現するモーション制御系
Fig.15. Total control system to be realized by March II.

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 $\dot{\gamma}$ 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 ($\dot{\gamma}$) 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。

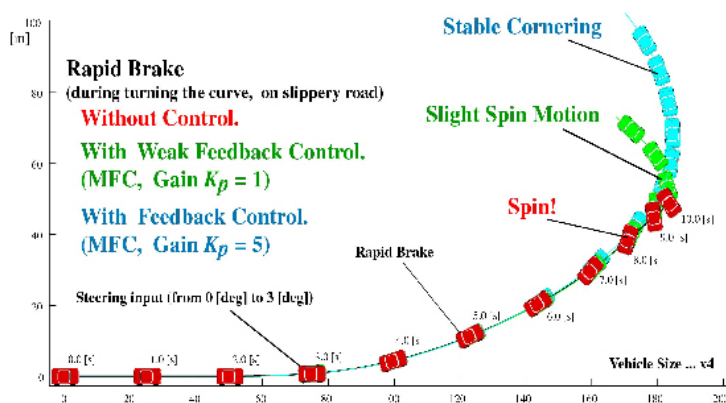
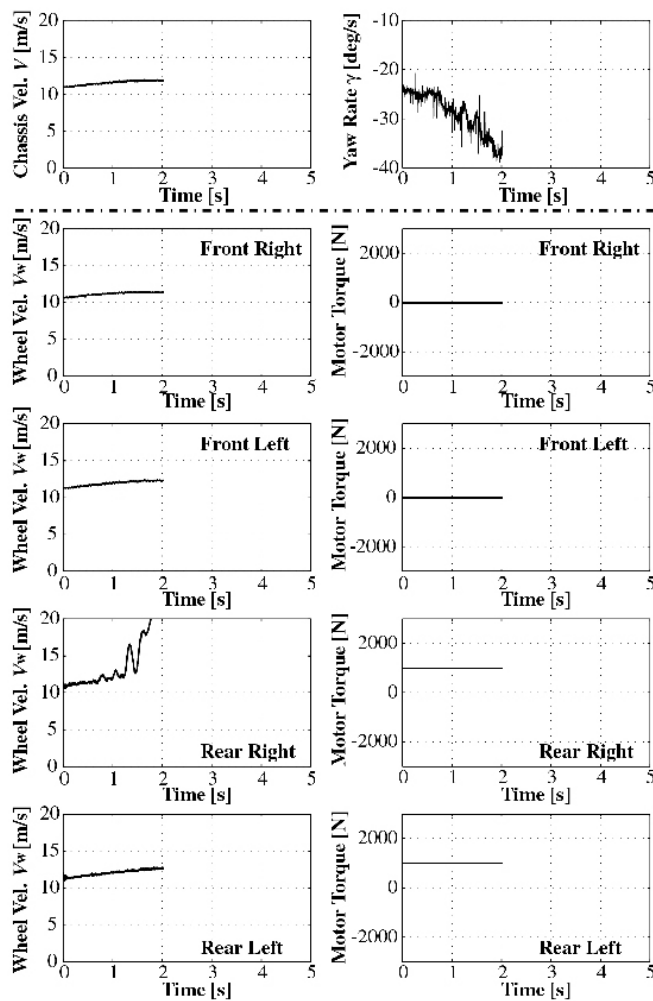
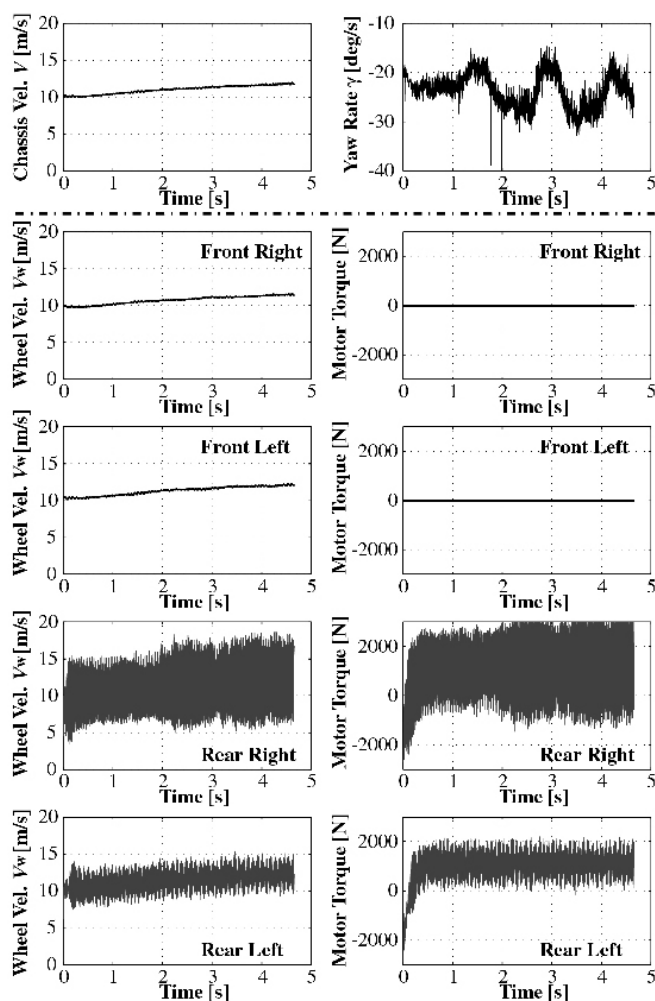


図 16 DYC における MFC マイナー制御の効果 (シミュレーション)
 Fig.16. Effect of the minor control loop MFC at each wheel to vehicle motion.



(a) 制御を行わない場合
 (a) without control



(b) 後輪 2 輪に MFC を施した場合
 (b) with MFC applied to rear two wheels

図 17 東大三月号 II による旋回実験
 Fig.17. Cornering experiment using "March II".

4. 3 車体すべり角 β の推定

ヨーレート $\dot{\gamma}$ と車体すべり角 β のうち、 $\dot{\gamma}$ 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ない。ここでは、 $\dot{\gamma}$ 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。

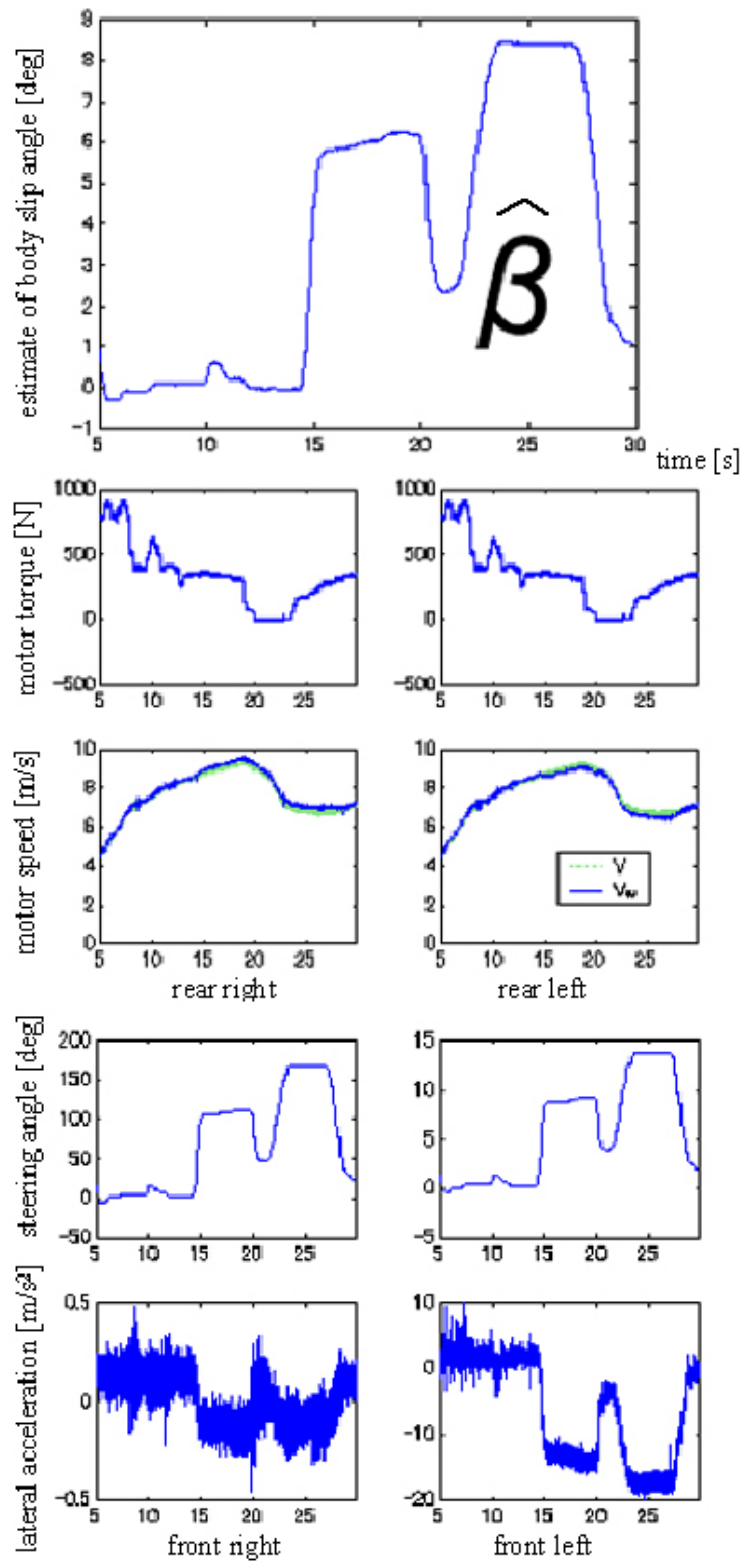


図 18 車体すべり角 β の推定実験結果
 Fig.18. Estimation experiment of body slip angle β .

5. あとがき

「電気と制御で走る近未来車両の研究」と題し、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。本稿は、参考文献[7]と同時期に執筆しているので重複があることをお断りしておく。

いままで、東大三月号の I および II を使って諸種の実験を行って来たが、3 台目の電気自動車(カドウェル EV と命名)がまもなく完成する。そこでは本質的なモータ特性の内側に入り込んださらに本質的で新しい制御の実現をもくろんでいる。機会があ

れば報告したい。

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、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日が遠くないことを知っているのである。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。諸賢のご意見をいただければ幸いである。

■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
- [7] 堀 洋一, 電気と制御で走る近未来車両の研究, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, 平成 16 年 3 月号(予定)

■付録 いくつかの問題提起

ここでは、文献[5]のまえがき付近に記した幾つかの問題提起を再掲し、読者諸賢のご意見をうかがいたいと思う。重複をお許しいただきたい。

(1) ブラシ付き直流モータ (DCM) は完全に過去のものか

DCM は歴史の古いモータであり小から大まで様々に用いられており、ミニ四駆などのおもちゃではもちろん主流のモータである。しかし、制御が容易であるという点を除けば欠点だらけである。とくに、重量あたりの出力が小さいことが致命的であり、鉄道や自動車のように軽量化が至上命令である場合には、完全に生命を絶たれたと言われる。そのほかの欠点として、ブラシと整流子は大電流を流すにもかかわらず常に磨耗するため、保守の労がたいへんであるという大欠点がある。鉄道車両用のモータが、急速に直流モータから誘導モータ (IM) に置き換わっているもう一つの大きな理由がここにある。

しかし、EV にとって AC 化は絶対必要であろうか。おそらくそうであろう。しかし車というものは 10 万 km~20 万 km と走り込むうちにだんだん傷んでくるものである。DCM であれば途中でブラシ部分を交換すれば性能はよみがえる。これはユーザにとっては大きな愉しみとなる。ヘアドライヤや掃除機のモータのようにかなりの高速回転をする用途でも、交流整流子機といって、整流子とブラシをもつモータが広く使われている例もある。車の寿命がきてもピンピンしているモータよりも、車ともにお役目を果たして一生を終えるモータに、愛着や魅力を感じるユーザは少なくないのではないだろうか。

(2) 誘導モータの効率は本当に低いか

どんなモータの比較表を見ても、誘導モータ (IM) のエネルギー効率は必ず永久磁石モータ (PM) に劣ることになっている。これは全速度・トルク領域でベクトル制御を行おうとするためである。IM は負荷の軽いときには励磁電流を絞って消費電力を下げるのが可能であるにもかかわらず、このことは意外と認識されていない。

電気自動車の場合、全負荷で長時間運転することはまずないから、低負荷時の効率改善は大きな意義をもっている。

IM の簡易等価回路を使い、1 次電流 i_1 の大きさ一定の条件のもとでトルク T を最大にする i_2 と i_m を求めると、付図 1 から両者の大きさをほぼ同一にすればよいことがわかる。実際には入力電力を測りながらリアルタイム探索によって励磁電流を最適化することも可能であり、結果的により実際的にこのような状況が達成されると考えられる。

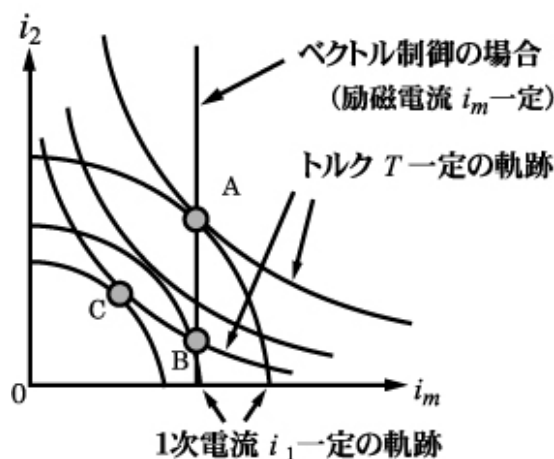
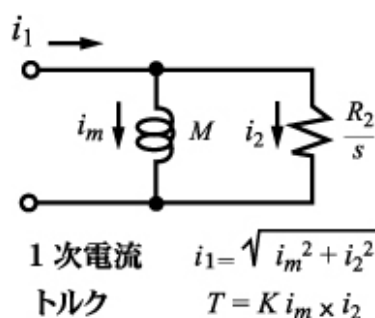
これを効率最大化制御と呼ぶ。2 次磁束の大きさ (i_m に対応) を一定に保つことがベクトル制御の条件であるから、 i_m がひんぱんに変化する効率最大化制御では厳密なベクトル制御は成立せず、過渡状態におけるトルク制御特性は当然犠牲になる。しかし工作機械のような精密位置決め制御をするわけではないから、著しい劣化でなければ問題ない。

通常の磁束を一定に保つベクトル制御の IM、効率最大化ベクトル制御を行った IM、通常の PM (IPM) を、実際の運転状態を模擬しながら効率を評価した例もある。その結果、最大効率は PM の方がよいが、40km/h 定速走行時には最大効率制御の IM の方がよい。しかし、市街地走行を模擬した 10-15 モードでは、また PM の方が長く走る結果となっている。街乗りクルマは PM、郊外に出るなら IM という住み分けはかなりはっきりいえることである。アメリカの電気自動

車が IM を用いる理由もこの辺にあるのかも知れない。

IM はなんといっても安価であり保守もほとんど不要である。エネルギー源の問題のない鉄道車両用モータはほとんど IM で

ある。これは電気自動車用とは定格が約一桁異なることが大きな理由であるにせよ、IM の実用面での優秀性を証明する事実でもある。



付図1 誘導機の効率最大化制御の考え方
 App.Fig.1 Principle of Maximum Efficient Control of Induction Machine

(3) インホイールモータは論外か

東京電力の IZA, 環境庁の Luciole, 慶応大学の KAZ, それからわれわれの MarchII などは、車輪にモータを埋め込んだインホイールモータを使用している。目的はそれぞれ異なっているけれども思想は明確である。新しいドライブトレインの構造の提案であったり、運動制御面での可能性の追求であったりする。

しかし、インホイールモータに対しては根

強い反対意見も少なくない。その最大のものはバネ下重量が増えるので論外であるというものである。最近のインホイールモータはずいぶん軽量になってきたし、モータ本体がバネ下重量にならないような構造上の工夫も見られるようになってきた。(たとえば、東京モーターショーで発表された、ブリジストンのダイナミックダンパー方式のインホイールモータ。)

エンジンの特性は振動なども含めてなる

べく路面やドライバに伝わらないようにしてきたが、電氣モータでの発想は逆である。インホイールモータではモータのもつ良い特性が路面に伝わりやすいので、制御面での利点を活かしやすい。その方向があるのではないだろうか。

ついでにいうと、4個のインホイールモータを使うと1個でも壊れたら困るのではないかと、という質問をよく受けるが、これは話が逆であって、1個でも生きていれば走ることができる、という方が正解である。信頼性は、 $0.99 \times 0.99 \times 0.99 \times 0.99 = 0.96$ ではなくて、 $1 - (0.01 \times 0.01 \times 0.01 \times 0.01) = 0.99999999$ になるのである。

(4) PMにはコスト以外の欠点はないか

とくに日本でもはやされるPMであるが、よく知られた欠点は値段が高いことと、永久磁石材料に資源面での不安があることである。しかしこれだけだろうか。

もう一つの重要なポイントは、モータ単体で高速回転をしていると非常に高い誘起電圧を生じることである。これは永久磁石をもつモータの宿命である。高速回転をさせるためには、この誘起電圧（逆起電力という）が邪魔をする。そのため、インバータを常にオン状態とし、インバータから磁石の力を弱める方向の電流をどんどん流し込んでやって（弱め界磁制御という）端子電圧の上昇を防ぎながら高速回転をさせるわけで、これがモータ効率をかなり下げる。高速道路を長距離ドライブするような用途には向かないのである。また、この高い電圧は、惰行時にインバータを切り離している場合には、制御状態に復帰するときインバータに負担をかけることになり、特別な工夫が必要である。

一方、IMの弱め界磁は文字通り界磁電流を弱める制御であって、余分なエネルギーを使わざるを得ないPMに比べて有利であ

る。また、惰行時にはIMは空回りするだけであるから電圧上昇の心配も、ついでに言えば、回転子位置の検出の必要もなく、新幹線はじめ高速鉄道でも多用されていることは衆知の事実である。

なお、この問題は、IPMにおける最適な永久磁石の量はどのくらいかという議論をよび起こしており、様々な視点から適切値が決められる、という形で決着するものと考えられる。

(5) 電力回生はほんとうに期待できるか

電氣自動車の特長として電力回生の利点がよくあげられ、電氣二重層キャパシタ(*)などへの回生技術には著者もたいへん魅力を感じる。しかし自動車では、タイヤ路面間で大半のエネルギーが失われるので、回生率は鉄道などに比べると極めて低いし、運動エネルギーは速度の二乗に比例するから、低速領域での電力回生は、エネルギーの有効利用という観点からはほとんど意味がないことには注意すべきである。

むしろ、エネルギーを積極的に使ってもエレベータのようになめらかに停止させるなど、制御面での利点を追求した方がよい。このような純電氣式ブレーキという発想は鉄道の方が先んじており、すでに実用車も走っている。人間機械系の調和を標榜する車が負けてはいられないであろう。

電氣モータでは、加速と減速から制動にいたる制御は、まったく継ぎ目がない。上位の制御系の要求に応じて、必要であれば自然に逆方向のトルクを発生して車は停止に至るのである。

(6) 低騒音化は絶対条件か

スイッチトリラクタンスモータ(SRM)の欠点として騒音があげられている。しかし電氣自動車は静かであればいいというものでもあるまい。おそらく初期の内燃機関エ

ンジンはおそろしく大きな騒音をたてていたことであろう。これを快適音に変えてきたことが、自動車工学者の最大の貢献である、と言っても過言ではないという人もいる。たしかに、性能の良いエンジンの発する音は心地よいものである。

モータの回転音やインバータ音、これを快適音に変えていくことはそれ程難しいと

は思えない。低騒音化ばかりが技術開発ではないと思うがいかがであろうか。

(*) 電気二重層キャパシタは、2003年10月に日本電子から従来の10倍の性能を持つものが発表され、大きな話題を呼んでいることは記憶に新しい。筆者もその将来性を高く評価している。



堀 洋一 (ほり よういち)

1978年東京大学工学部電気工学科卒業，1983年同大学院博士課程修了。助手，講師，助教授を経て，2000年2月より電気工学科教授。2002年10月より東京大学生産技術研究所教授。専門は制御工学とその産業応用，とくに，モーションコントロール，メカトロニクス，電気自動車などの分野への応用研究。最近は福祉制御工学を開始。この間，1991年～1992年，カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。2001-2002年，IEEE Japan Council および Tokyo Section トレジャラ。現在，電気学会産業応用部門副部門長。1993年および2001年，IEEE Trans. on Industrial Electronics 最優秀論文賞，2000年電気学会論文賞などを受賞。電気学会，計測自動制御学会，IEEE，日本ロボット学会，日本機械学会，自動車技術会，日本シミュレーション学会などの会員。

FED レビュー, Vol. 3 No. 4, 2004年2月12日 第1版

* 著作権は新機能素子研究開発協会に帰属します。



この事業は、オートレースの補助金を受けて実施したものです。