

電気自動車の制御—東大三月号のめざすもの—

堀 洋 一*

*東京大学 工学系研究科 電気工学専攻 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 Ce-501 本部

* The University of Tokyo, Department of Electrical Engineering Rm. Ce-501, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, Japan

* E-mail: hori@iis.u-tokyo.ac.jp

キーワード：電気自動車 (electric vehicle), 運動制御 (motion control), 路面状態推定 (road state estimation), 電気モータ (electric motor), 電気二重層キャパシタ (EDLC).
JL 0003/06/4503-0001 ©2005 SICE

1. 電気自動車の特長

EV (電気自動車) は電気モータで動くため、ICV (内燃機関自動車) にはまねのできない3つの特長がある。これを活かさないでEVのメリットはほとんどない。

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ならモータは5msである。この100倍の差を使って、ガソリンと電池のエネルギー密度差100倍を取り返さなければならない。逆に、電気モータの高速かつ正確なトルク応答を活用できればEVにはバラ色の未来が開ける。

車は平行移動であるから原理的にエネルギーは要らない。ロスのお大半はタイヤ路面間の摩擦で生じる。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の組み合わせはよくすべるから、モータによる粘着制御が不可欠である。新幹線が時速300km/hを越えてなお駆動できるのは粘着制御のおかげである。

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こともよく知られている。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。これは不思議なことである。

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)があり、両者は異なる。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スリップに対する応答とは別物である。まさに2自由度制御の概念そのものである。

いままでEVといえば、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てきた。EVのエネルギー効率は決してよくないし、発電所の種類によって二酸化炭素も結構出す。トルク応答という時間軸を持ちこまないで勝ち目はない。

モータは分散配置してもコスト高にならない

エンジンを4つ使う車は非常識である。しかし、電気モータは4つに分けて車輪に入れてもそれほどコスト高にはな

らない。逆に、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はもとより、横方向の運動も考えたヨーレートやすべり角の制御が考えられる。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。EVの4輪独立駆動は、ステアリングやデフによる駆動力配分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のである。

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」という警告を出すことも可能になるから、安全性向上には大きく貢献するであろう。

このような、電気と制御の世界にこそ、EV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、EVといえは高性能制御車という時代がやってくる。

2. 電気モータのトルク速度特性

図1は、よく見る「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、微少な速度変化が生じたときトルクがどの方向に反応するかを、2種類模式的に描き込んでみた。

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

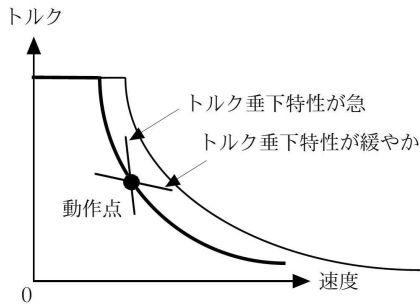


図1 電気モータの速度・トルク特性（このような図では過渡的性質は表現できない）

を行う通常の制御では、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にしておくと、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、ドライバのトルク指令に対する応答とはまったく別物である。モータの過渡特性は、図1のような静的な速度・トルク特性曲線では表現できない。静的なトルクカーブ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、時間軸がごっそり抜けてしまい、落とし穴にはまってしまうのである。

3. 「東大三月号I」の研究

3.1 東大三月号I

以上のようなEVの積極的な優位性に光を当て、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2世代以上前のニッサンマーチであり、東大弥生キャンパスで製作したので三月号と名付けた。図2にその外観、図3に制御系構成を示す。

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EVでは容易に実現可能である。



図2 東大三月号I

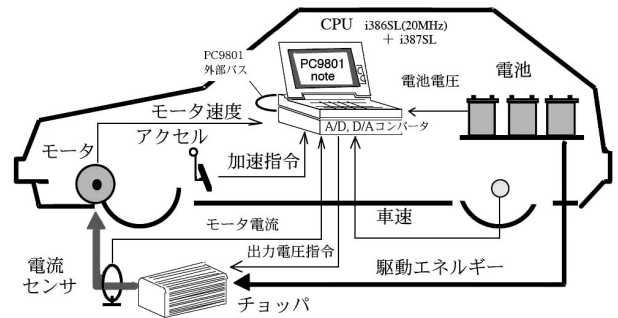


図3 東大三月号Iの制御系構成

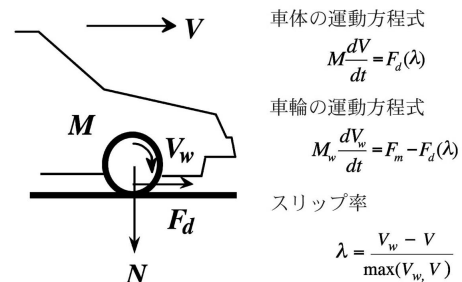


図4 車輪回りの運動方程式

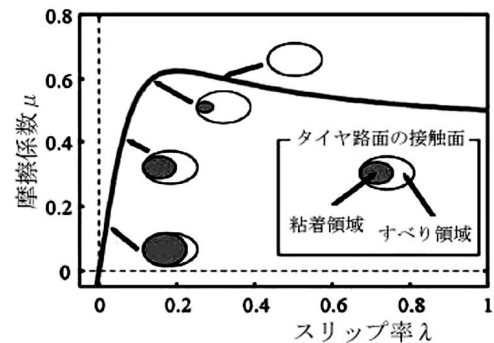


図5 μ - λ 曲線

(1) スリップ率制御

図4は車輪回りの運動方程式を示す。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 μ - λ 曲線において、 $\lambda = 0$ 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 μ - λ 曲線のピークの右側にいると思われる不安定領域でも、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輪同時駆動もできない。そこで、車輪速度のみを用いた制御は重要である。たとえ

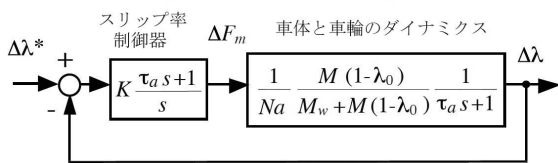


図6 スリップ率制御系

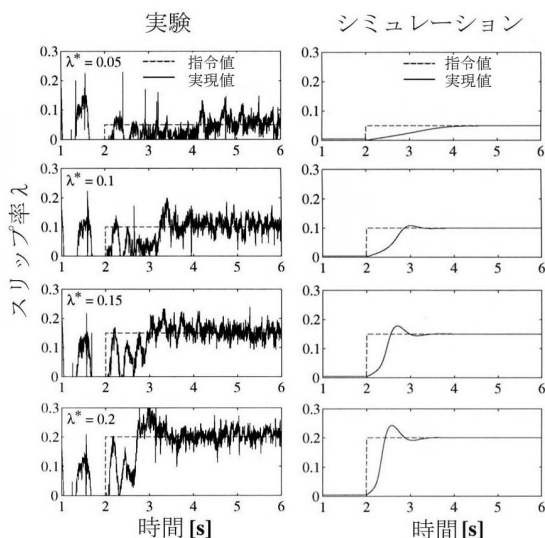


図7 スリップ率制御のシミュレーションおよび実験結果

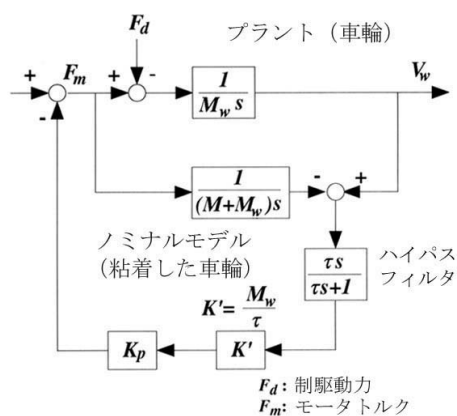


図8 疑MFC (モデル追従制御)

ば、図8に示す擬似的なモデル追従制御(疑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実験の結果を図9に示す。タイヤのすべりやすさは、路面の状態とタイヤの材質や空気圧だけで決まるとは思っていないだろうか。これが駆動するモータの制御によって異なるなんてことがあるだろうか？しかし図9からは、制御の効果は明確でしかも調整できることがわかる。「電気制御によって機械特性が変わる」ということを示している。

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

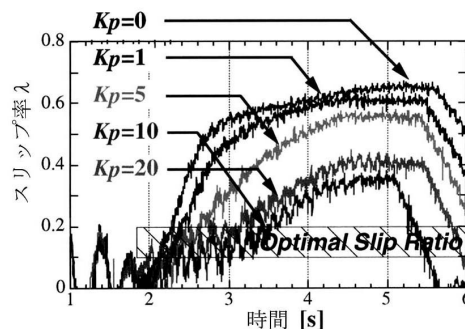
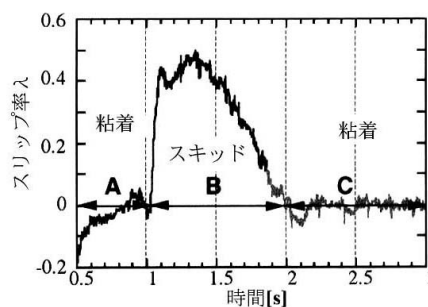
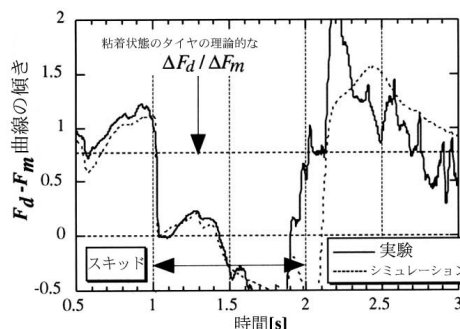


図9 疑MFCの実験結果



(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

タイヤ慣性を重く見せかける制御であり、車輪に設けた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EV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。

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

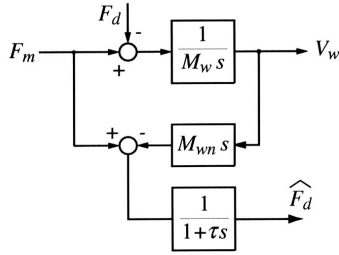


図 11 駆動力オブザーバ

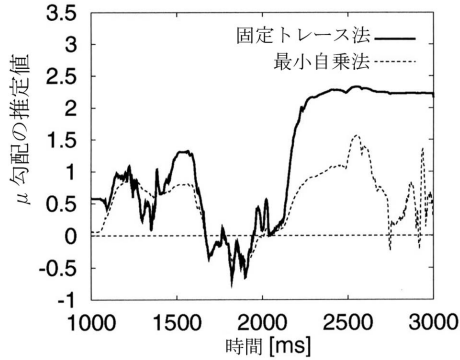


図 12 μ 勾配の推定結果

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 EV 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，いま車が 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．

そのためには，タイヤから路面に伝わる制駆動力を知る必要があるが，EV では駆動力オブザーバと呼ぶ推定器を容易に構成できる（図 11）．これはモータトルクが把握可能だからである．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．

(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， μ - λ 曲線のピーク入値の推定がある．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．

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

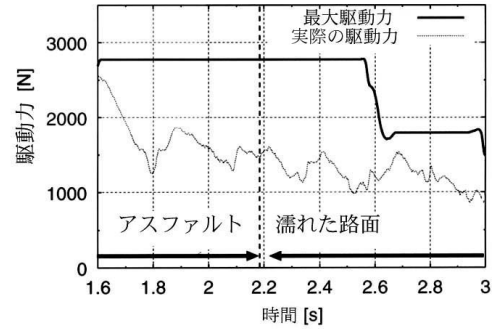


図 13 路面が急変する場合の駆動力と最大駆動力の変化

板に入る．路面の変化は 2.6s 付近で最大摩擦係数の減少として検出されている．このような急変はドライバには検知しにくいから，安全性は大きく向上する．さらに ITS という枠組みでは，車そのものが文字通り動く路面センサになり，中央に情報を集めればいくらでも使い道がある．

4. 「東大三月号 II」の研究

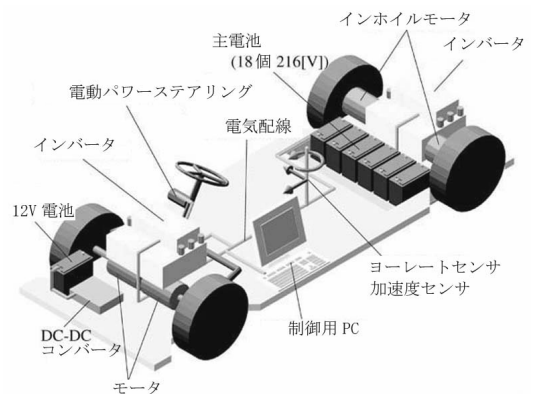
4.1 東大三月号 II

図 14 は多少の資金を得て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 輪の完全独立駆動を行う．図 15 はここで実現しようとしているモーション制御系である．

姿勢制御系は，車体すべり角 β とヨーレート γ をある値



(a) 外観



(b) 制御システムの概要

図 14 東大三月号 II の外観

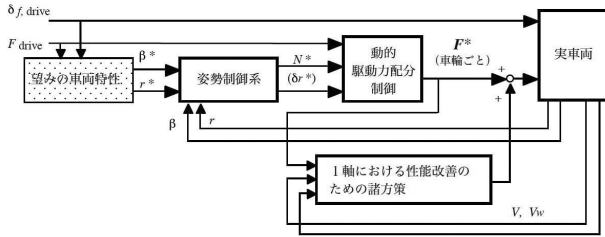


図 15 東大三月号で実現するモーション制御系

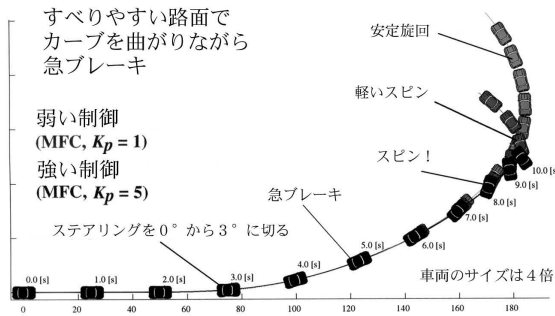


図 16 コーナリングにおける MFC の効果 (シミュレーション)

に保つため、制御入力としてヨーモーメント力 N^* と後輪舵角 δ_r^* を出力する。これらの指令を満たすように 4 輪の駆動力が決められるが、そこには冗長性があるため、駆動力配分制御が可能になる。

各輪の駆動力が決まったあと、さらに 1 軸における性能改善を行うための諸方策を盛り込んだマイナーループが加わって、最終的なトルクが決まる。電気モータの速く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に作り込まれる増粘着制御である。

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。EV 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、ドライバの指令するステアリング角からヨーレート

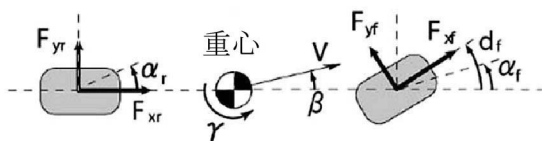


図 17 車両の 2 輪モデル

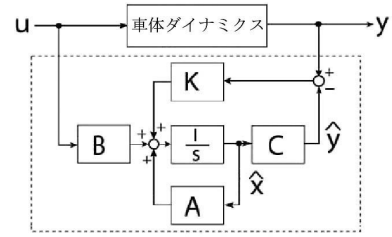
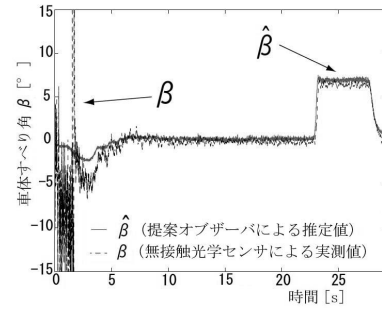
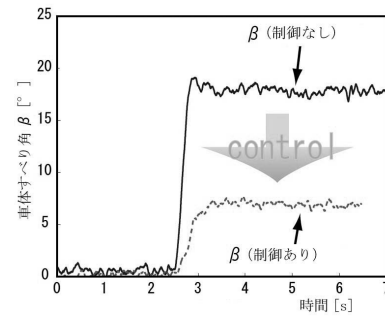


図 18 β オブザーバの構成



(a) β の推定



(b) β の制御

図 19 β の推定と制御の実験結果 (三月号 II)

γ への線形性 (操舵安定性) と、車体の方向と車体速度の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、路面や車両パラメータの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特性が作られ、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、従来の手法とは考え方も手法も全く異なる (東大三月号 II で得た実験結果は紙面の都合で割愛する。文献や HP の動画を見ていただきたい。)

4.3 車体すべり角 β の推定と制御

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 はきわめて困難である。オブザーバを用いて推定するしかない。ここでは、 γ と β を状態変数とする 2 輪モデル (図 17) を用い、教科書どお

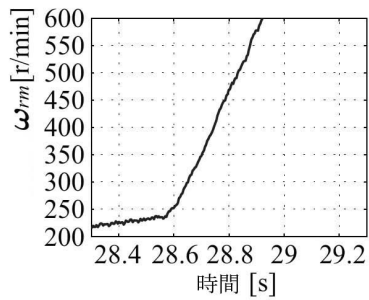


図 26 フィードバック電流制御方式による空転の発生（カドウェル号による実験結果）

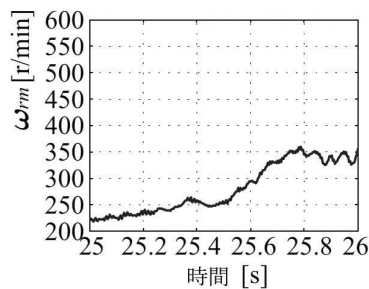


図 27 2自由度制御による空転の抑圧

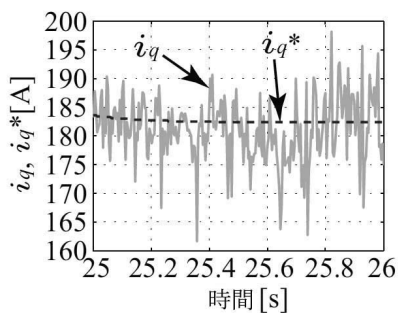


図 28 図 27 の実験におけるトルク分電流波形

5.2 カドウェル号による実験結果

80Nm の一定トルク指令で加速中に、乾燥アスファルト路面から濡れたアルミ板へ進入する実験を行った実験結果を示す。従来手法（図 26）では、スリップの発生時にモータの回転速度が急上昇するが、提案手法では、速度上昇が抑制される（図 27）。

図 28 は図 27 の実験におけるトルク分電流の様子である。スリップが起こってもタイヤはすぐに再粘着して所望のトルク指令が実現されるので、短い時間でトルクが大きく垂下する様子を見ることはできない。

6. キャパシタビークル「コムス CV」の開発

6.1 電気二重層キャパシタ

近年注目を集めているキャパシタには、次のような特長がある。

- (1) ほとんど劣化しない（化学変化を伴わないので物理電池といわれる）
- (2) 大電流の動作が可能（数分で充電できる）
- (3) 材料の環境負荷が小さい（重金属を使わない）
- (4) 端子電圧から残存エネルギーがわかる（走行距離がわかるので少ない搭載量でも安心）

このようにキャパシタは従来の化学電池にない特長を持つが、パワー密度は大きいもののエネルギー密度はようやく鉛蓄電池に追いついた程度で、リチウムイオン電池の約 1/10 である。しかしナノゲートキャパシタなどの新技術によって追いつく可能性がある。

一方、キャパシタを利用する上で注意すべき点は、

- (1) 電気分解が始まる電圧（有機系で約 3 V）以上では使用できない
- (2) キャパシタは充放電にともなって電圧が大きく変動するという点である。

高電圧を得るためにはセルを多数直列接続し、セルごとの最大電圧をそろえる並列モニターと呼ぶ均等化回路が必要である。「エネルギーと知恵の缶詰」と呼ぶ理由がここにある。また、モジュール全体の電圧低下に対しては、直並列切替（バンク切替）、チョッパを用いた電圧一定化、それから、インバータに直結という有力な方法がある。どの方法に軍配があがるかは現時点では不明である。

6.2 コムス CV の製作

コムス CV（図 29、トヨタ車体制一人乗り小型 EV）は、EV の運動制御の原理原則的な側面をほり下げる目的で作っている。大きい車は充電に時間を要し、テストコースに持ち込むためには時間も費用もかかる、また、タイヤの非線形領域まで踏み込んだ粘着制御や、鋭いコーナリング性能などの危い実験はできない。

図 30 はコムス CV の制御系構成である。図 31 はキャパシタである。インバータは直流電圧 30V から 100V までの範囲で動作するように設計した。これで満充電の約 90% のエネルギーを利用できる計算になる。

車輪ごとの粘着制御はインバータの制御用 PC に分担させ、上位の Linux PC で車両全体の運動制御を行う。予定している実験は下記のとおりである。



図 29 キャパシタだけで駆動するコムス CV

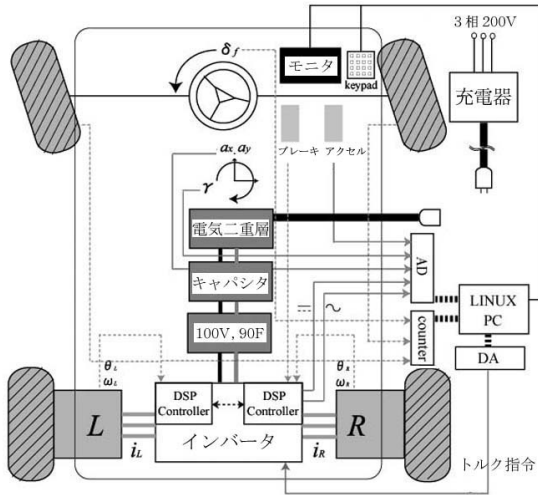


図 30 コムス CV の制御系設計



図 31 電気二重層キャパシタの一例 (100V, 25F)

- (1) 車体すべり角 の推定と制御 (タイヤの非線形領域で)
 - (2) ヨーモーメントオブザーバを用いた車両特性のノミナル化による DYC 制御 (超小型車ならではの厳しい条件での実験)
 - (3) 非線形領域での μ 勾配の推定 (とくにタイヤのブラシモデルと駆動力オブザーバを用いたピーク μ の推定)
 - (4) ドライバの意図を読みスムーズな加減速を実現する速度パターンのリアルタイム生成
 - (5) 横力の推定を用いた制駆動力配分制御 (余力のあるタイヤに大きな制駆動力を動的に配分する手法)
- また、前後方向の増粘着制御として、
- (6) 疑モデル追従制御によるトラクション制御
 - (7) 逆起電力オブザーバによるスリップ抑制制御
 - (8) 油圧と電気によるハイブリッド ABS や TCS (応答は遅いが力が出る油圧と、速いが弱い電気の協調)
 - (9) 他励直流モータトルク垂下特性をまねる粘着制御

などについても、きめ細かい実験を多数回繰り返し、統計的にも意味のある実験データを収集する予定である。

図 32, 図 33 はテーマ (4) の入り口で、エレベータのように加速し減速して止まる車をめざしている。ドライバの意思を推測しながら加速度の変化率 (ジャーク) まで滑

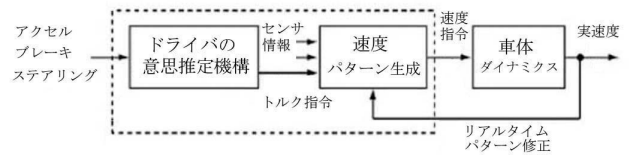


図 32 なめらかな速度パターンの発生

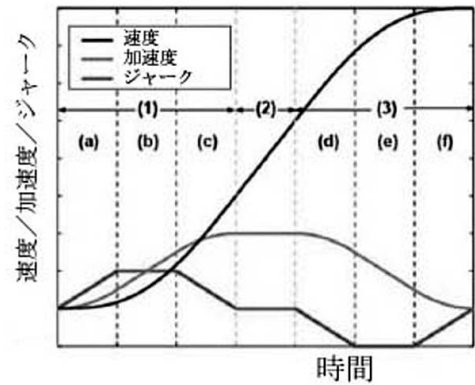


図 33 なめらかな速度パターンの例

らかにする速度パターンを自動生成する。低速領域での電力回生はほとんど意味がない。エネルギーを積極的に使っても制御面での利点を追求した方がよいと考えている。

7. 問題提起

最後に電気モータに関して 2 つほど問題提起をしておく。

(1) 永久磁石型モータ (PM) を使い続けてよいのか

EV 駆動用モータは PM が主流である。どんな比較表を見ても、誘導モータ (IM) のエネルギー効率は必ず PM に劣る。これは全速度・トルク領域でベクトル制御を行うためである。しかし、IM は負荷の軽いときには励磁電流を絞れば消費電力は下げられる。自動車は全負荷で長時間運転することはないから、低負荷時の効率改善は重要である。

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、両者の大きさをほぼ同一にすればよいことがわかる (図 34)。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。これを効率最大化制御と呼ぶ。

たしかに最大効率は PM がよいが、例えば 40km/h 定速走行時には効率最大制御の IM の方がよい。市街地走行を模擬した 10-15 モードでは、今度は PM の方が長く走る。街乗り車は PM、郊外に出るなら IM ということになる。

強力な永久磁石に使われる希土類は中国一国に資源が集中するため、これを使い続けてよいかどうかはセキュリティ上問題であるという意見も強い。なお、アメリカの EV はほぼすべて IM を用いている。

もう一つ重要な点は、PM が高速回転をす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

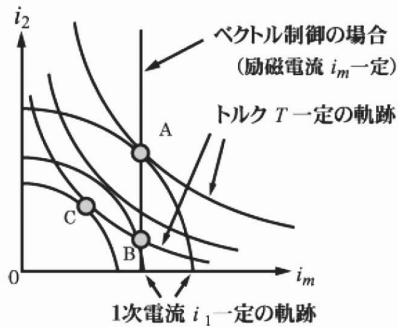
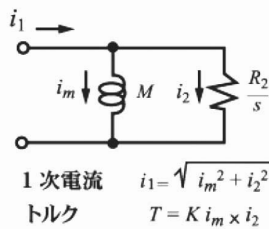


図 34 誘導モータの効率の考え方

タの宿命である。高速回転をさせるためには、インバータを常にオン状態とし磁石の力を弱める電流を流し込んで（弱め界磁制御という）端子電圧の上昇を抑える。これがモータ効率をかなり下げたため、高速道路を長距離ドライブでは不利になる。

一方、IMの弱め界磁は文字通り界磁電流を弱めるだけである。余分なエネルギーは使わない。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い。IMは安価で保守もほとんど不要であり、リサイクル性にも優れる。新幹線はじめ鉄道のモータはほぼすべてがIMである。

(2) 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やEllica、それからわれわれのMarch、カドウェルEV、コムスCV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。また、三菱自動車のランサーエボリューションも4輪駆動のインホイールモータである。目的は、床の低いドライブトレインの提案であったり、新しい運動制御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も少なくない。その最大手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。しかし最近のインホイールモータはずいぶん軽量になったし、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、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。）

ガソリン車ではエンジンの振動はなるべく路面やドライブに伝わらないようにしてきたが、電気モータの発想は逆である。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。

インホイールの4輪駆動車は、車体側にモータをおいた場合と異なり、1個のトルクが抜けても車体を回すような力は生じないことも報告されている。さらに、4個のインホイールモータを使うと1個でも生きていれば走ることができる。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。

8. あとがき

本稿を執筆している時点で、50周年を迎えた東京モーターショーが開催中である。かつては実験車のブースにまとめられていたEVは、ハイブリッド車とともに普通の車として出品されている。中でも、三菱自動車のMIEVと富士重工のR1eが目される。数年以内の実用化をめざした純EVである。50年後のモーターショーでは、エンジン車は記憶の歴史館にまとめられているかもしれない。

最近のハイブリッド車は電気モータのパワーがエンジンを凌ぐようになってきている。これにプラグインハイブリッドという夜間充電の仕組みが加わると、エンジンの出番はどんどんなくなる。エンジンは降ろしてもハイブリッド車の作ったマーケットは残る。電力会社が背中を押し、50年もすればキャパシタ駆動の超小型EVがたくさん走っているかも知れない。ハイブリッド車はあまり小さい車ではペイしない。燃料電池車の実現は15年以上先であるから、環境にやさしい純EVがこのシナリオで普及する可能性がある。

筆者がこういうことを言うと、そんなことにはなりませんよ、と非常に評判が悪い。ところが、モーターショーの会場で、それは本当にそうなる可能性があるから評判が悪いのだ、と言われた。真偽のほどは不明である。

しかし、近未来の車は「電気」で走る。もう間違いない。10年前に同じことを言うと首をかじげた人も、今は首を縦にふる。世界がオートショーと名乗っても、日本では50年前からモーターショーである。モーターショーが将来モータ技術を競う場になることを知っているのである（こういうことを言うから叱られる。）

そして一番大切なことは、車が電気モータで動いたらその本質は「制御」にある、ということである。まさにSICE会員が大活躍する大海原が横たわっているのである。

(2005年10月31日受付)

参考文献

- 1) 酒井：タイヤ工学, グランプリ出版 (1987)
- 2) 岩間, 稲熊, 浅野：車両のアクティブ制御, 計測と制御, 28-7, 844/853 (1992)
- 3) M. Nagai, S. Yamanaka and Y. Hirano: Integrated control law of active rear steering control, Proc. of 3rd International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC), 451/469 (1996)
- 4) T. Kawabe, M. Nakazawa, I. Notsu and Y. Watanabe: A

sliding mode controller for wheel slip ratio control system, Proc. of 3rd AVEC, 797/804 (1996)

5) 永井, 王: 左右駆動力の配分制御による電気自動車の運動制御, 電気学会論文誌 D, **116**-3, 279/284 (1996)

6) J. Ackermann: Robust control prevents car skidding, IEEE Control Systems Magazine, **17**-3, 23/31 (1997)

7) U. Kiencke and A. Daiss: Observation of lateral vehicle dynamics, Control Engineering Practice, **5**-8, 1145/1150 (1997)

8) 安部: 操縦安定性と安全のための最近のシャシ制御技術, 自動車技術, **51**-11, 11/19 (1997)

9) 山崎: 走行中のタイヤと路面間の摩擦係数推定技術, 自動車技術, **51**-11, 58/62 (1997)

10) F. Gustafsson: Slip-based tire-road friction estimation, IFAC Automatica, **33**-6, 1087/1099 (1997)

11) Y. Hori, Y. Toyoda and Y. Tsuruoka: Traction control of electric vehicle: Basic experimental results using the test EV UOT Electric March, IEEE Trans. on Industry Applications, **34**-5, 1131/1138 (1998)

12) 安部, 大沢: 自動車の運動性能向上技術, 自動車技術会編集 自動車技術シリーズ 4, 朝倉書店 (1998)

13) 鶴岡, 豊田, 堀: 電気自動車のトラクションコントロールに関する基礎研究, 電気学会論文誌 D, **118**-1, 45/50 (1998)

14) S. Sakai, H. Sado and Y. Hori: Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors, IEEE Trans. on Mechatronics, **4**-1, 9/16 (1999)

15) 堀: 「家田編著, 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)

16) 坂井, 佐渡, 堀: 電気自動車における車体速度情報不要の新しいタイヤ空転検出法, 電気学会論文誌 D, **120**-2, 281/287 (2000)

17) 坂井, 佐渡, 堀: 4輪独立駆動電気自動車における動的な制駆動力配分法, 電気学会論文誌 D, **120**-6, 761/768 (2000)

18) 片岡, 佐渡, 坂井, 堀: ファジィ推論を用いた電気自動車用トラクションコントロールシステムのための最適スリップ率推定器, 電気学会論文誌 D, **120**-4, 581/586 (2000)

19) 堀, 坂井, 片岡: 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, **45**-5, 231/239 (2001)

20) T. C. Minh and Y. Hori: Convergence Improvement of Efficiency-optimization Control of Induction Motor Drives, IEEE Trans. on Industry Applications, **37**-6, 1746/1753 (2001)

21) 堀, 寺谷, 正木: 自動車用モータ技術, 日刊工業新聞社 (2003)

22) C. Chakraborty and Y. Hori: Fast Efficiency Optimization Techniques for the Indirect Vector-Controlled Induction Motor Drives, IEEE Trans. on Industry Applications, **39**-4, 1070/1076 (2003)

23) Y. Hori: Future Vehicle driven by Electricity and Control, CCC-2004 (China Control Conference), Shanghei, plenary lecture (2004)

24) S. Kodama, L. Li and Y. Hori: Skid Prevention for EVs based on the Emulation of Torque Characteristics of Separately-wound DC Motor, Proc. AMC-2004 (2004)

25) Y. Hori: Future Vehicle driven by Electricity and Control -Research on 4 Wheel Motored 'UOT March II-', IEEE Trans. on Industrial Electronics, **51**-5, 954/962 (2004)

26) 堀: 電気と制御で走る近未来車両に関する研究, FED レビュー, **3**-4 (2004)

27) 堀: 電気と制御で走る近未来車両の研究, 生産研究, **56**-2, 131/137 (2004)

28) 青木: 電気自動車における車体すべり角オブザーバのロバスト化と実車データによる検証, 電気学会論文誌 D, **125**-5, 467/472 (2005)

29) H. Fujimoto, T. Saito and T. Noguchi: Motion Stabilization Control of Electric Vehicle under Snowy Conditions Based on Yaw-Moment Observer, Proc. 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'04), 35/40 (2004)

30) 高橋, 藤本, 裾坂, 野口: 電気自動車における車両横すべり角推定法の一提案, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-05-73 (2005)

[著 者 紹 介]

ほり よう いち
堀 洋 一 君 (正会員)



1955年7月14日生. 78年東京大学電気工学科卒業, 83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. 02年10月より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, 電気自動車など. 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 (上級会員, 03-04年産業応用部門副部門長), IEEE (Fellow), 日本シミュレーション学会 (理事) などの会員. 05年より ECaSS フォーラム会長. EVS22 (06年10月) プログラム委員長.