

電気自動車の増粘着制御の構図と展望

堀 洋一（東京大学）

〒113-8656 文京区弥生2-11-16 東京大学工学部総合試験所

TEL: 03-3812-2111 ex.7680, FAX: 03-5800-3865, E-mail: hori@hori.t.u-tokyo.ac.jp

1. まえがき

電気自動車には、従来のガソリン自動車にはなかったいくつかの可能性を見いだすことができる。一つは、電気モータの高度な制御性をいかした増粘着制御であり、いま一つは複数輪独立駆動による車両姿勢制御である。

これらの可能性のもたらす新たな自由度は、人間操縦系として望ましい特性をもった車両、すなわちより操縦しやすい安全で快適な車の実現につながる。

このような視点に立ち、個人的に面白そうな研究項目をあげてみると、以下のとおりである。

- (1) 電気自動車ならではの可能性の抽出と検討
 - ・モーション制御（増粘着制御，トラクション制御，車体運動の安定化制御...）
 - ・車両デザイン（モータ数の最適化，信頼性向上...）
 - ・用途開発（都市内セカンドカー，障害者・高齢者のための車，空港など特殊用途の発掘...）
 - ・情報・メディア（ナビゲーション，交通管制...）
 - ・人間機械系としての電気自動車（ドライバは車に何を指令し，車から何を受け取るのがよいか...）
- (2) 電気自動車の新しい制御
 - ・増粘着制御（ABSを含むブレーキ制御，トラクション制御，瞬時車速推定，路面状態推定，電気鉄道の再粘着制御の勉強...）
 - ・車体ダイナミクス制御（ ， の制御，4輪独立駆動またはステアリング制御，センサ...）
 - ・知的交通システム（自動運転の可能性，高速道路への合流離脱制御，安全・安心工学...）

EV（電気自動車）がICV（内燃機関自動車）と大きく異なる点は、当然であるが、EVは電気モータで動くということである。

電気モータの最大の特長は、トルク応答がエンジンの2ケタでいど速いことである。エンジンが100msならモータは1msである。このことはよく認識されているはずなのに、意外と強調されることが少ない。PNGV（The Partnership for a New Generation of Vehicles）でもなぜか欠落しているし、EVS-14にも該当するセッションは見あたらなかった。しかし、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、電気自動車には夢のある未来が開ける。

車の運動は平行移動であるから、原理的にはエネルギーは不要である。ロスの大半はタイヤ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レールを使うためである。ただしよくすすべる。従って、モータによる粘着制御が不可欠であり、そうしてはじめてまともに走っている。粘着特性

がモータの種類や制御方式によって全く異なるということも、鉄道の世界では常識である。

EVのモータ制御は、エンジンはもとより、鉄道のモータ制御に比べてもはるかに高性能である。これをして、モータの応答は速すぎるので人間系になじまないという人がいる。これ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、両者は独立である。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粘着特性などは別物であることも、制御の世界ではいわば常識である。

定常的な速度・トルク特性や効率マップだけで比較すると、EVの勝ち目はほとんどない。過渡特性を論じてはじめて差が生じる。増粘着制御が成功すれば、ロスが半分のタイヤ用いて一充電走行距離は一気に倍となる。

さらに、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モーション制御が可能である。前後方向の運動を対象としたトラクション制御、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。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。インホイールモータでもよい。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だろう。

このようにして、きわめて制御性のよい車両ができ上がる。ユーザーが買いたくなる魅力を持たせないと、絶対にEVは普及しない。電気モータの速くて正確なトルク応答を活かした制御の分野にその鍵がある。

本論文では、このような視点に立ち、前半では、東大三月号による増粘着制御、後半では、IZAやLucioleのような2輪ないし4輪駆動車での2次元車両制御の可能性について述べる。

機械系（車体構造，ステアリング...）
モータはトルク発生機

電気系・機械系の境界領域
（粘着制御，ユーザインターフェース...）
機械系の特性は電気制御によって変えられる

電気系（モータ，インバータ，バッテリー...）
高効率化，軽量化などに重点

図1 電気自動車は電気・機械複合系

2. トラクション制御 (1次元)

図2に示すように、タイヤと路面の摩擦特性は、前後、横方向とも適度な摩擦係数をもつスリップ率の範囲があることが知られている。この特性は鉄道でも共通であるが、横軸のスケールや、鉄道では横力は考慮しなくてよいことなどに違いがある。

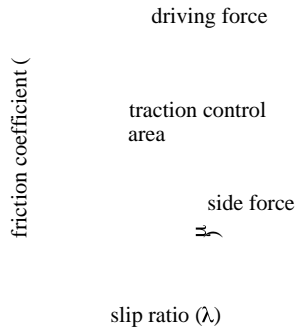


図2 タイヤと路面の摩擦特性

2.1 モデル追従制御

まず手始めに、図3のようなモデル追従制御 (MFC) を行ってみる。車両特性は単純な慣性モーメントとし、スリップが生じればその値が急速に小さくなるとする。モデルの方はすべらない車体モデル、すなわち、一定の慣性モーメントとし、両者の差から演算される補正トルクをドライバのトルク指令から差し引いている。

図4, 図5に実験の方法とその結果を示す。スリップの発生によって、モータトルクが急速に低下し再粘着に至る様子が見てとれる。

ここで重要なことは、このようなきわめて簡単な電気制御でも、機械系の性質を改変することが可能であるということである。

また、ドライバのトルク指令に対する車の応答と、スリップに対する応答とは、全く別物であるということにも注意したい。これは2自由度制御系の本質である。

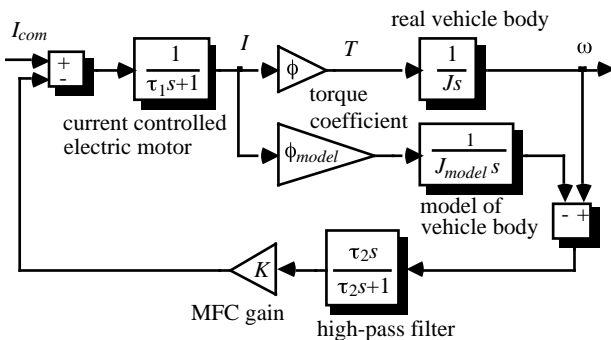


図3 モデル追従制御 (MFC)

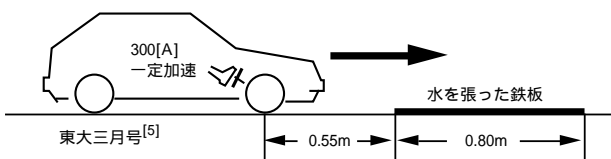
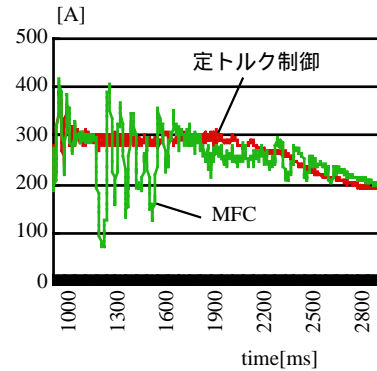
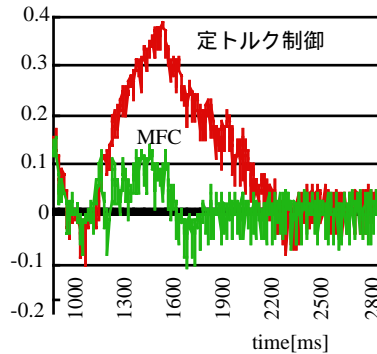


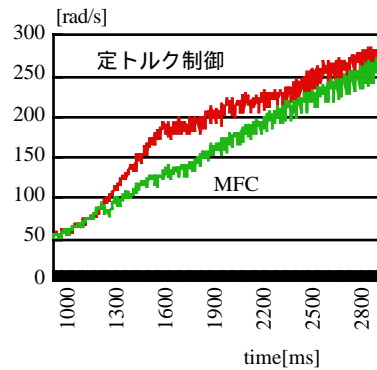
図4 スリップ実験



(1) モータトルク



(2) スリップ率



(3) モータ速度

図5 定トルク制御とMFCの実験結果

2.2 最適スリップ率制御

図6に示す最適スリップ率制御は、さらに一步踏み込んだ制御方策であり、最適スリップ率の範囲に、実際のスリップ率を積極的に保とうとするものである。

詳細は省略するが、あるスリップ率におけるモータトルクからスリップ率までの伝達関数を求めれば、

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta F_m} = \frac{1}{Na} \frac{M(1-\lambda)}{M_w + M(1-\lambda)} \frac{1}{1+\tau s} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{Na} \frac{MM_w V_{w0}}{M_w + M(1-\lambda)} \quad (2)$$

という一次遅れ系となる。ただし、車体速度 (V_{w0}) や μ - λ 曲線の傾き (a) などさまざまな変数を含む、やややっかいな性質を持っており、とくに、 μ - λ 曲線のピークの右側では不安定なシステムである。

種々検討の結果、制御器は図7に示すような、可変ゲインのPI制御器で十分であることがわかる。その場合、スリップ率指令に対する応答は、

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda^*} = \frac{1}{1 + Na \frac{M_w + M(1-\lambda)}{M(1-\lambda)} \frac{1}{K} s} \quad (3)$$

のようになる。図8には、実際の μ - λ 曲線の傾き a_r 、制御器のゲイン K の変動に対する根軌跡を示す。かなり大きなパラメータ変動に対してロバストであることがわかる。また、 μ - λ 曲線のピークの右側（不安定領域）にスリップ率を保つことさえ可能であることもわかる。

図9に東大三月号を用いた実験結果を示す。スリップ率はほぼ指令値に追従していることがわかる。

ガソリン車で同じことを実現しようとする、トルク応答の遅れのために、系はたちまち不安定になる。

電気モータの性質は非常に素直であり、いっけん複雑に思える机上の制御理論が、現実にもほぼそのまま適用できるということがわかる。電圧、電流、回転速度などの情報が容易に利用できることも強味である。

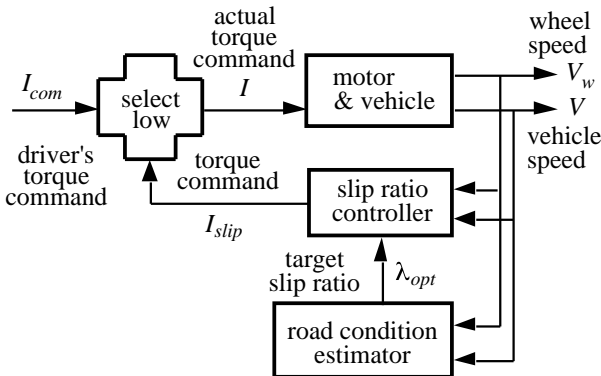


図6 路面状態推定にもとづく最適スリップ率制御

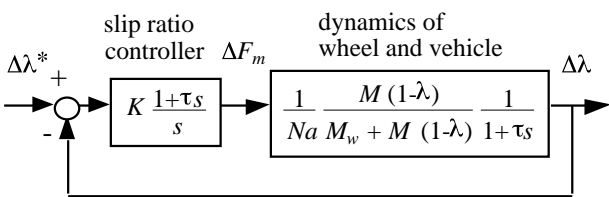


図7 路面・タイヤの動特性（線形化モデル）とスリップ率制御器

3. モーション制御（2次元）

制御による前後方向の粘着特性の向上は、横方向の車両運動を考えたヨーレート制御などにも、大きな効果があるはずである。

車体のダイナミクスは、車両姿勢の方向と車両運動の方向のずれ（すべり角）と、重心まわりの角速度（ヨーレート r ）を用いた非線形、あるいは線形状態方程式によって表現することができる。これにもとづいて状態オブザーバを構成したり、フィードフォワードあるいはフィードバックによる安定化制御を行ったりする試みがなされている。

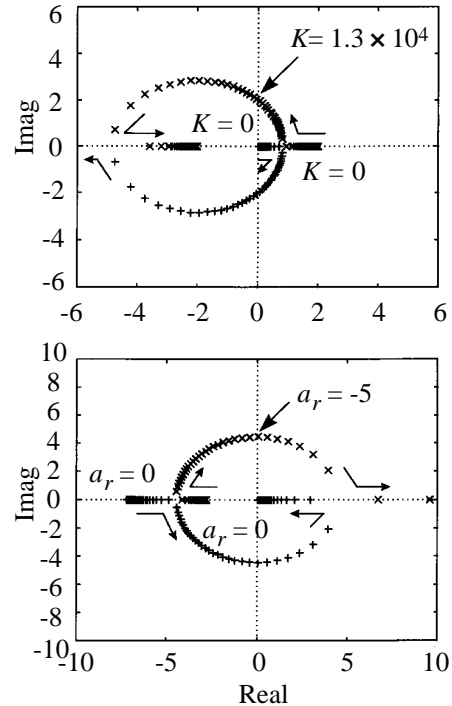


図8 パラメータ変動に対する閉ループ系の根軌跡

従来のガソリン車を対象に開発されてきたこれらの手法は、すべて、より制御性のよい形で電気自動車に適用可能である。インホイールモータを用いた4輪駆動車ではこの傾向はさらに著しくなる。

制御という観点から電気自動車を眺めると、従来のガソリン自動車に対して有利な点は、

1. 駆動輪の発生トルクを正確に遅れなく把握できる。
2. そのトルクを正確かつ高速に制御できる。

という2点である。

前節ではこのような利点を1次元の運動制御に適用する試みを紹介したが、本節ではさらに

3. インホイールモータの複数使用により、各輪の完全独立駆動制御が可能である。

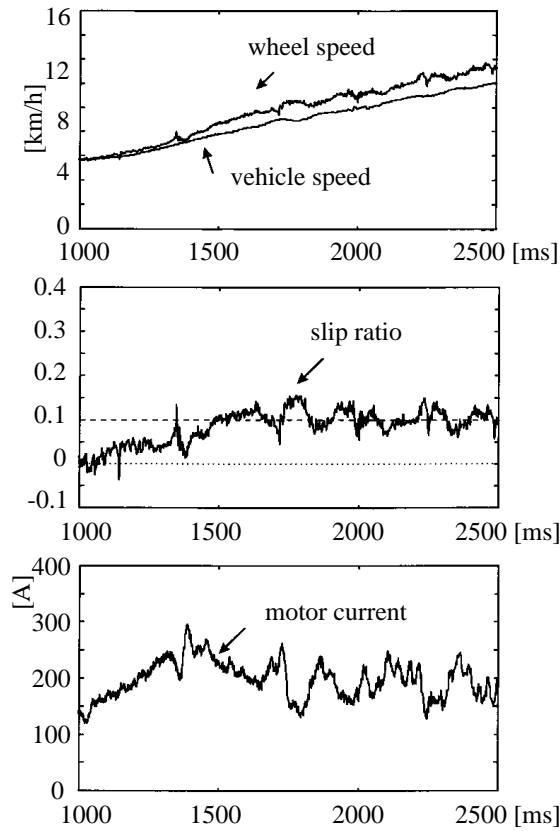
という特長もそなえた2輪ないし4輪駆動車を考える。

3.1 駆動力オブザーバと新しいトルク制御系

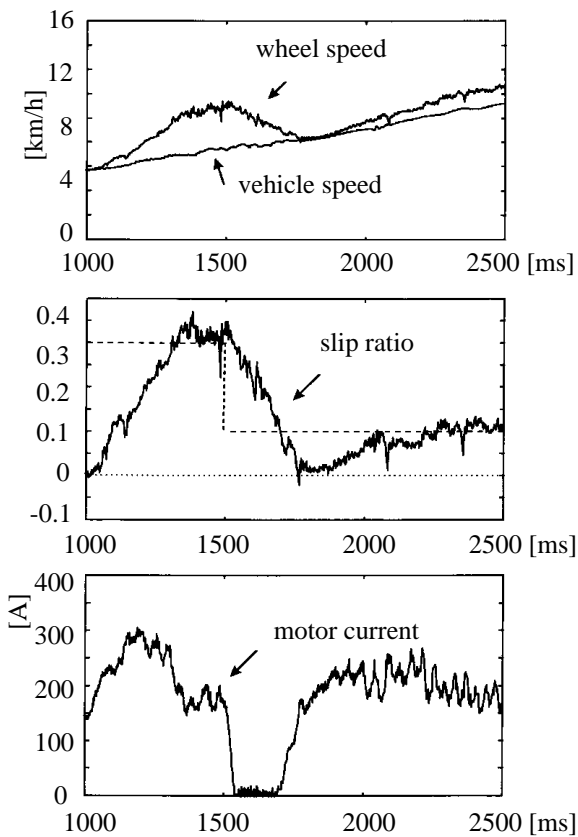
東大3月号における基礎的な実験結果から、駆動輪で発生する駆動力は、20~30[ms]程度の時定数をもつオブザーバで十分推定できると考えられる。詳細は省略するが図10に推定結果の一例を示す。

東大3月号は、エンジンをモータに置き換えた初歩的なコンバートカーである。モータから駆動輪までの間には軸ねじれ系による共振要素や、トランスミッションなどの非線形要素が介在しているため、トルク制御や駆動力オブザーバの応答速度はあまり速くできなかった。

しかし、インホイールモータを用いた実験車両では、これらの要素は存在しない。そのため、より小さい推定時定数をもつ駆動力オブザーバが構成可能である。その結果、図11のようなトルク制御系を用いて、タイヤ・路面系のもつ強い非線形性を吸収でき、各駆動輪の駆動力を直接、独立かつ高速にフィードバック制御できると考えられる。



(a) スリップ率指令が一定の場合



(b) スリップ率指令を変化させた場合

図9 最適スリップ率制御の実験結果

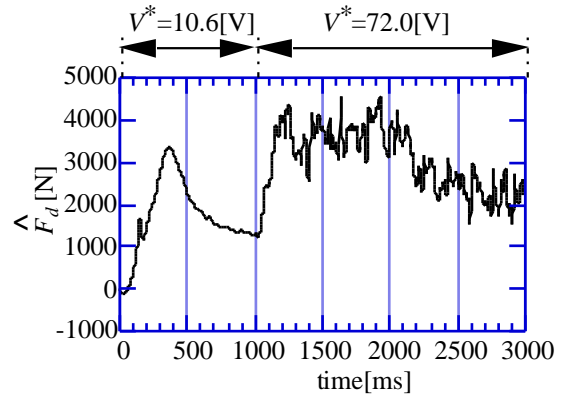
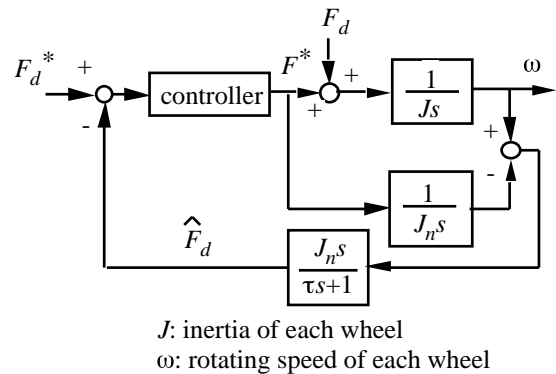


図10 駆動力オブザーバによる駆動力の推定結果 (\hat{F}_d が推定駆動力。 V^* はチョッパへの電圧指令である。)



J : inertia of each wheel
 ω : rotating speed of each wheel

図11 新しいトルク制御系の構成

このような駆動力制御の適用によって、従来のガソリン自動車における駆動力配分制御を、はるかに高性能化できると考えられる。

さらに、インホイールモータを用いた車両では、左右で符号の異なるトルクを発生することも簡単にできるから、正確で広い範囲のヨーモーメント力を発生することができる。将来は、ヨーモーメント力そのものを車両運動制御の入力変数として用いることが可能となるであろう。

3.2 モデルマッチング制御とそのロバスト化

車体のダイナミクスを、車両すべり角とヨーレート r を用いた非線形状態方程式によって表わし、 r を推定するオブザーバを構成し、その制御を行うことを考える。(ガソリン自動車での豊富な研究例がある。)

オブザーバの設計には、多くの文献で指摘されているように、各駆動輪の駆動力を把握する必要がある。これは電気自動車においては容易であり、従ってより高性能なオブザーバが構成可能である。その推定値をフィードバック制御に用いることができれば、よりロバストで安定な車両運動制御を実現することができる。

各駆動力が独立に制御可能で、かつ、 r が推定できる場合、どのような制御が考えられるのであろうか。われわれは、その一つとして図12のようなモデルマッチング制御を検討している。モデルマッチング制御は、望ましい目標モデル車両の挙動に実際の車両運動が追従するように、制御入力を与える制御であり、もともとは、後輪操舵と駆動力配分を統合する目的から提案された制御手法である。

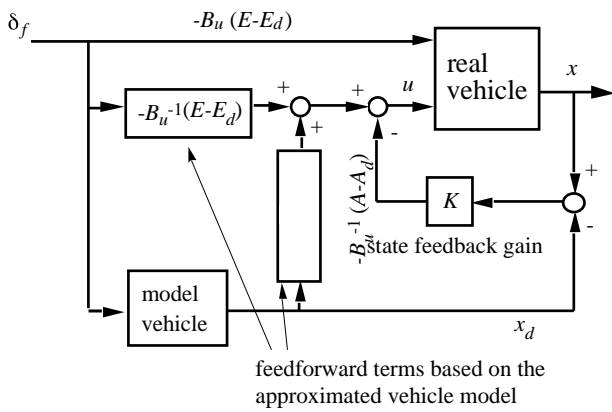


図 1 2 モデルマッチング制御 (MMC)

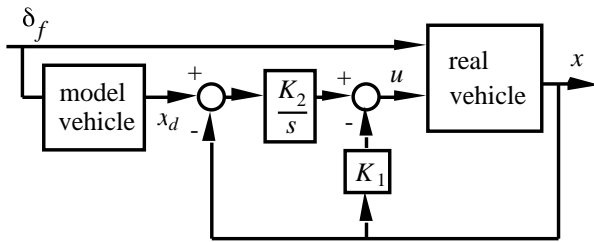


図 1 3 定常特性を改良したモデルマッチング制御 (ロバストMMC)

モデルマッチング制御は、

1. 外乱や環境の変化に対してロバストな車両を実現できる。
2. 車両運動の動的な特性を変えられる。

などの特徴が知られているが、ここでは、車両運動の静的なステア特性まで変えようとしている。

非線形シミュレーションを行ってみると、フィードフォワードを基本とする図 1 2 のような制御系では定常偏差を生じ、のぞみの特性を実現できない。しかし、最適追従サーボ系を用いて定常特性を改善した図 1 3 のような制御系を用いれば、この問題を解決することができる。シミュレーション結果を図 1 4 ~ 図 1 8 に示す。

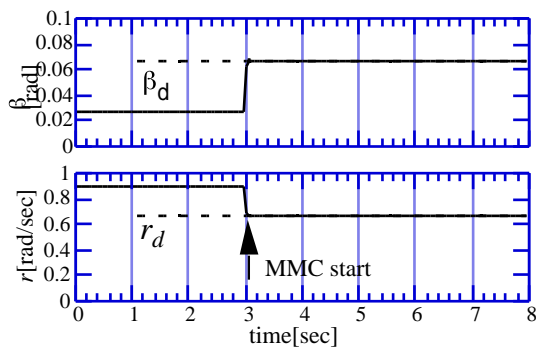


図 1 4 MMCのシミュレーション結果
(誤差のない2輪線形モデルを使用)
(モデル誤差もないので定常偏差も生じない。)

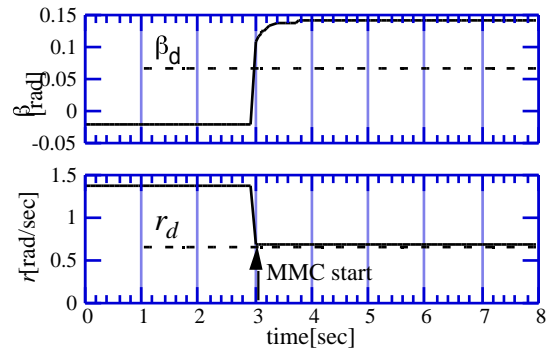


図 1 5 MMCのシミュレーション結果
(2輪線形モデルを使用。ただし、コーナリングステイフネスに誤差を含んでいる。)
(モデル誤差のために定常偏差を生じている。)

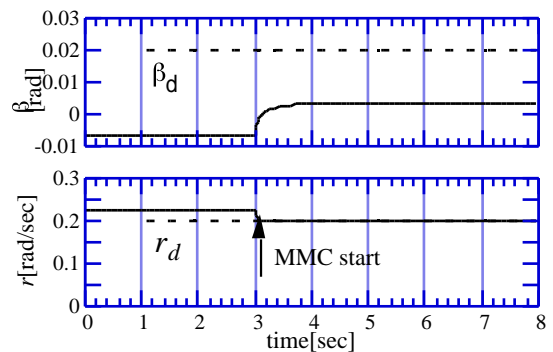


図 1 6 MMCのシミュレーション結果
(誤差のない4輪非線形モデルを使用。)
(モデルの誤差はないが、非線形性の影響で定常偏差を生じている。)

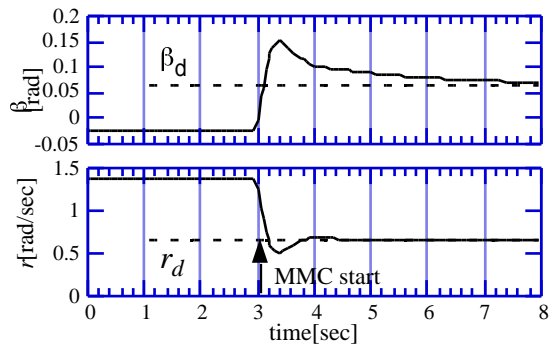


図 1 7 ロバストMMCのシミュレーション結果
(2輪線形モデルを使用。ただし、コーナリングステイフネスに誤差を含んでいる。)
(モデル誤差を抑圧し、定常偏差は解消される。)

従来のガソリン自動車でも指摘されていることであるが、駆動力配分制御はタイヤの横力が減少する非線形運動領域でとくに効果的である。

また、電気自動車では車輪の駆動力そのものを完全に独立に制御できるため、タイヤのすべり角によって発生させる横力を利用せざるを得ない、ガソリン車の4WSとは制御性能が根本的に異なることには注意する必要がある。今後、このような点をよく考慮しながら、タイヤ横力と駆動力配分により発生するヨーモーメントとの最適な組み合わせを検討していく予定である。

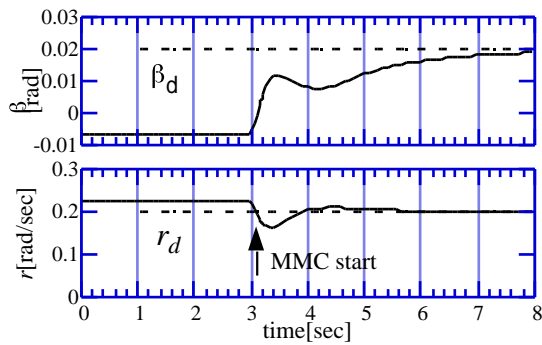


図18 ロバストMMCのシミュレーション結果

(誤差のない4輪非線形モデルを使用。)
 (非線形性を抑圧し、定常偏差は解消される。)

4. さらなる可能性

電気モータは自分の出すトルクを正確に知ることができるので、モータ速度、非駆動輪速度などを併用して路面状態のオンライン推定なども可能であり、より気のきいた制御法がいろいろ考えられる。(図19, 図20に、東大三月号を用いた基礎的な実験結果を示す。)

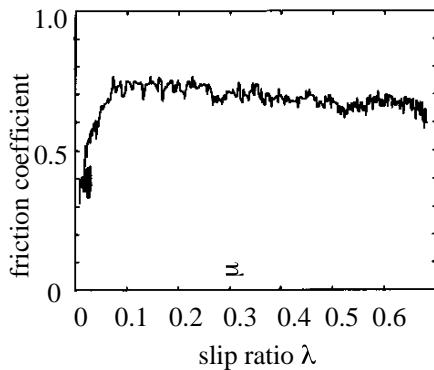


図19 乾いた路面における μ - λ 曲線の推定結果 (実験)

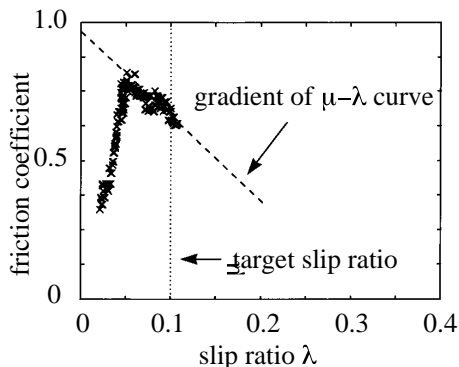


図20 スリップ率制御をかけた状態での μ - λ 曲線の推定結果 (実験)

5. あとがき

以上、電気自動車ならではの研究開発の一例として、筆者の研究室で行っている増粘着制御の試みを紹介し、4輪独立駆動による車体制御の可能性について述べた。

もともと増粘着制御は鉄道におけるアイデアを輸入したものである。しかし、電気自動車のモータ制御の方が高級であることから、電気自動車での技術開発がうまくいけば、鉄道の粘着制御に逆輸入される可能性も大きく、両分野の技術交流が期待される。

さらに、電気自動車を人間機械系ととらえれば、人間にとって操縦しやすい車とはどのようなものであるか、機械系とどのような情報をやり取りするのが望ましいか、といった研究も興味深くかつ重要である。現在、人間の特性のモデル化法などについて調べている。また機会があれば稿をあらためて報告したい。

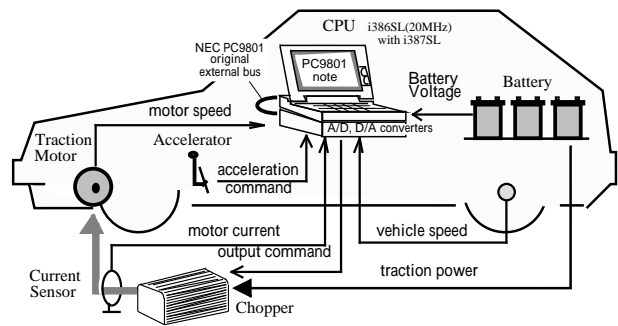
謝辞

本論文で示した実験などは、古谷武大(現関西電力)、豊田 靖(現日立製作所)、鶴岡慶雅(大学院生)、佐渡秀夫(学部学生)らが当研究室において行ったものである。第3章のシミュレーションは、坂井真一郎(大学院生)による。車両の製作に当たっては、内田利之、山崎一彦両技術官の助力が大きい。併せて謝意を表する。

参考文献は紙面の都合で省略いたします。



付図1 東大三月号



付図2 東大三月号の構成



付図3 製作予定の東大3月号II(4輪独立駆動車)