

電気自動車の新しい制御技術

- トラクション制御とモーション制御 -

堀 洋一 坂井真一郎
(東京大学)

New Control Techniques of Electric Vehicle - Traction Control and Motion Control -

Yoichi Hori and Shin'ichiro Sakai
(The University of Tokyo)

Keywords: Electric vehicle, Vehicle dynamics, Skidding, Stability, Electric motor, Electronic control /
Experimental study, Slip ratio control, Identification, Yaw rate control

1. まえがき

従来の電気自動車研究は、ガソリン車の代替が頭にある。そのため、バッテリー性能の向上や回生ブレーキによる一充電走行距離の向上、モータ性能や制御技術の改善といった点に主眼がおかれてきた。しかし、電気モータの高い制御性を活かすことによって、ガソリン自動車にはできない高度な運動制御が可能であるということは意外に知られていないようである。EVS-14でもこのことをexplicitに指摘した論文は数編に過ぎず、しかも、単に指摘しているだけで、具体策については何ら述べられていない。

たとえば、タイヤと路面の粘着特性は、モータ制御の方式によって非常に影響を受ける。もともとすべりやすい鉄車輪とレールを用いる電気鉄道分野では常識であり、積極的な増粘制御が行われている。このような、機械・電気複合系の制御（モーション制御）に関する検討が、電気自動車では著しく不足している（図1）。

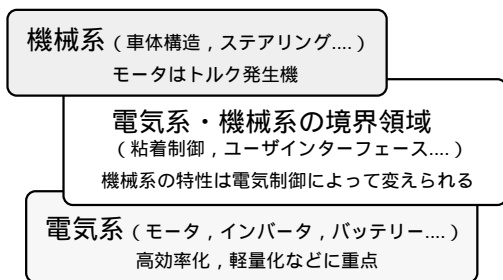


図1 電気自動車は電気・機械複合系である

電気自動車のモーション制御は、前後方向の運動を対象としたトラクション制御（1次元）と、横方向の運動も考えたヨーレートやすべり角制御（2次元）に分けることができる。後者を広くモーション制御と呼ぶことにしよう。

前後方向で、加速時にスリップを抑制する制御をトラクション制御、ブレーキ時のものをABSというが、EVでは両者を区別する意味がないので、まとめてトラクション制御と呼んでおくことにする。

ABSは現行の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が、トラクション

制御は、一部の高級乗用車などで既に実用化されているものの、付加ハードウェアが必要なためコストが高かったり、エンジンの応答が遅いために制御性能が不十分であるなど不満な点も少なくない。

表1にガソリン車におけるトラクション制御の分類とその評価を示す。

表1 トラクション制御の分類（ガソリン車）

	制御性	応答	コスト	操作感	総合評価
エンジン制御					
ブレーキ制御				×	
ミッション制御		×			×
エンジン+ ミッション制御					
エンジン+ ブレーキ制御					

電気自動車であれば、モータトルクの制御、すなわちソフトウェアだけで、ガソリン自動車よりも高性能なトラクション制御が実現できる可能性がある。タイヤと路面の摩擦特性には、前後方向、横方向ともに適度な摩擦係数をもつ最適スリップ率の範囲がある。この範囲にスリップ率を保ち、前後方向の粘着特性を向上することができれば、2次元でのモーション制御（ヨーレート制御など）にも大きな効果があるはずである。

本論文では、このような視点に立ち、前半では、電気自動車のトラクション制御として、東大三月号によるモデル追従制御とスリップ率制御の試みを紹介する。後半では、東京電力のIZAや国立環境研Lucioleのような、小型モータ（例えばインホイールモータ）を複数使用した2輪ないし4輪駆動車での2次元車両制御について述べる。モータの制御性の良さに加えて各輪の駆動力が独立に制御できるとき、どのような車両運動制御が可能となるのだろうか。

このような、電気自動車ならではの長所を追求しておくことが、いま一番大切なことであると考えている。

2. トラクション制御 (1次元)

タイヤと路面の摩擦特性は、図2に示すように、前後方向、横方向とも適度な摩擦係数をもつ最適スリップ率の範囲があることが知られている。この範囲にスリップ率を保つにはどうすればよいだろうか。

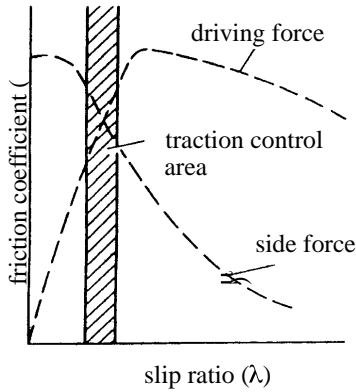


図2 タイヤと路面の摩擦特性

2.1 モデル追従制御

まず、電気モータの高速で正確なトルク応答(数~数十[ms])の効果を見るために、図3のような簡単なモデル追従制御を行ってみる。車両特性は簡単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。

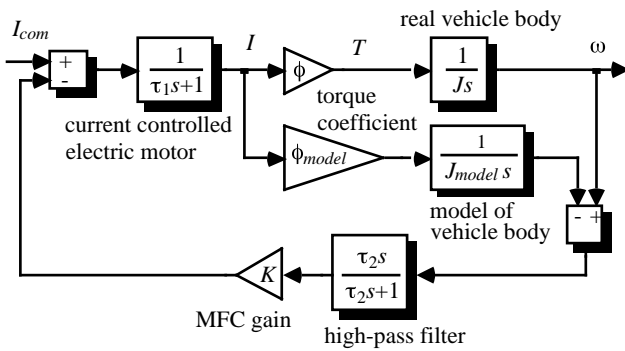


図3 モデル追従制御 (MFC)

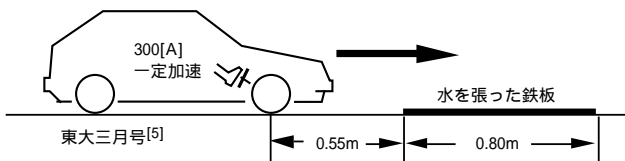
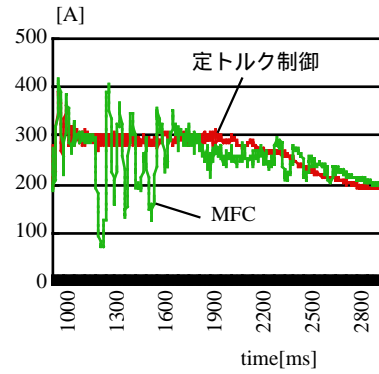
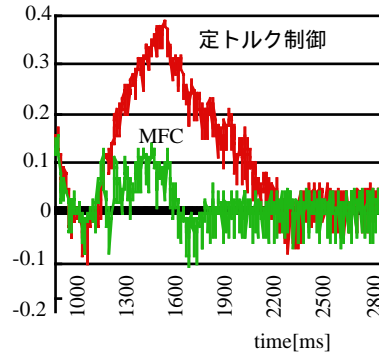


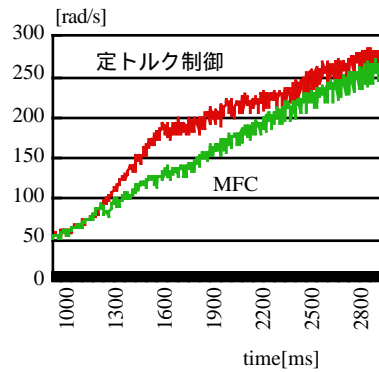
図4 スリップ実験



(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

ここで重要なことは、非常に簡単な電気制御によって機械系の性質を改変することが、確かに可能であるということである。少なくとも何かできるのである。

また、ドライバのトルク指令に対する車体の応答と、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。すなわち、目標値応答と外乱応答は別々に設定可能である。これは2自由度制御系の本質である。

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、図2に示した最適なスリップ率の範囲に、実際のスリップ率を積極的に保つものである。

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んでいる。

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、

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

のように計算される。図8には、 μ - λ 曲線の傾き (a)、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などもわかる。

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するのは至難の業であると思われる。電気モータの性質が非常に素直であり、電圧、電流、回転速度などの情報が容易に利用できることが強味である。いっけん複雑に思える机上の制御理論が、現実にはほぼそのまま適用可能であるということも重要である。

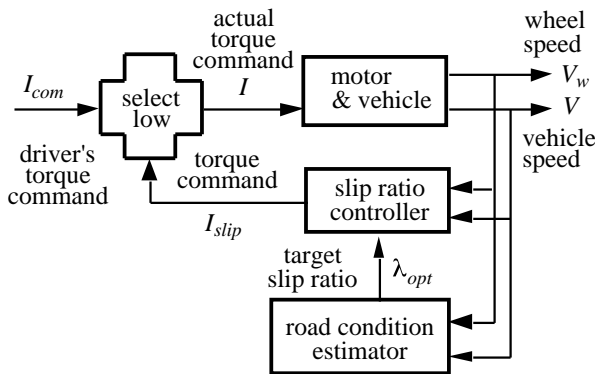


図6 路面状態推定にもとづく最適スリップ率制御

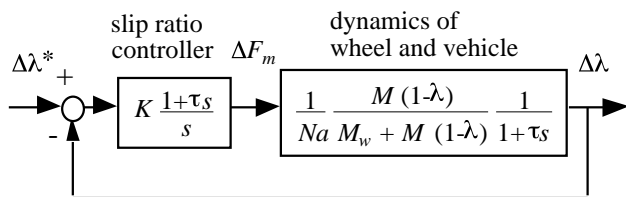


図7 路面・タイヤの動特性 (線形化モデル) とスリップ率制御器

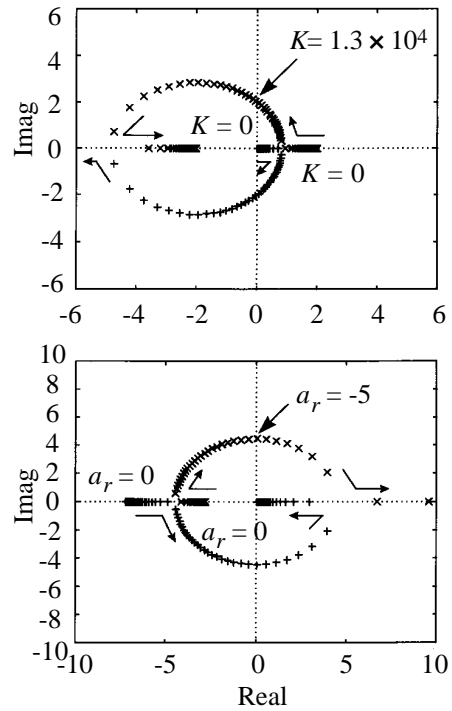


図8 パラメータ変動に対する閉ループ系の根軌跡

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ある。

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。

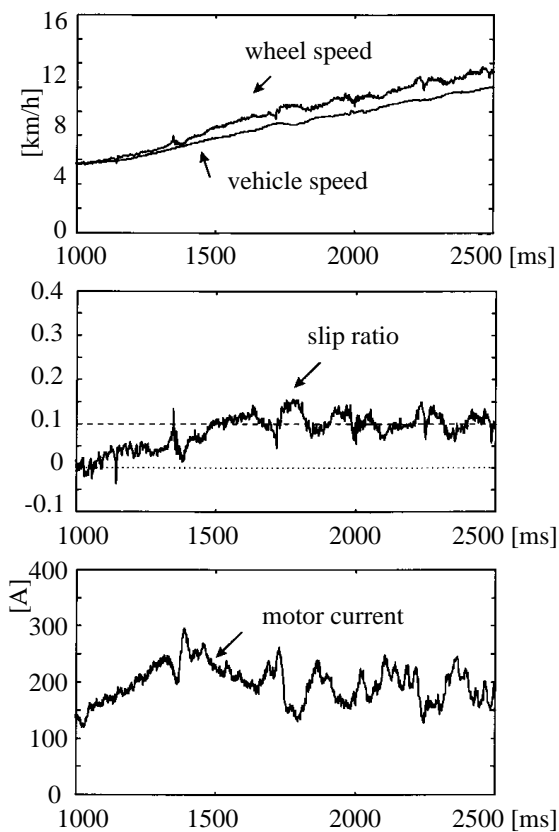
前節ではこのような利点を1次元の運動制御に適用する試みを紹介したが、本節ではさらに

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。

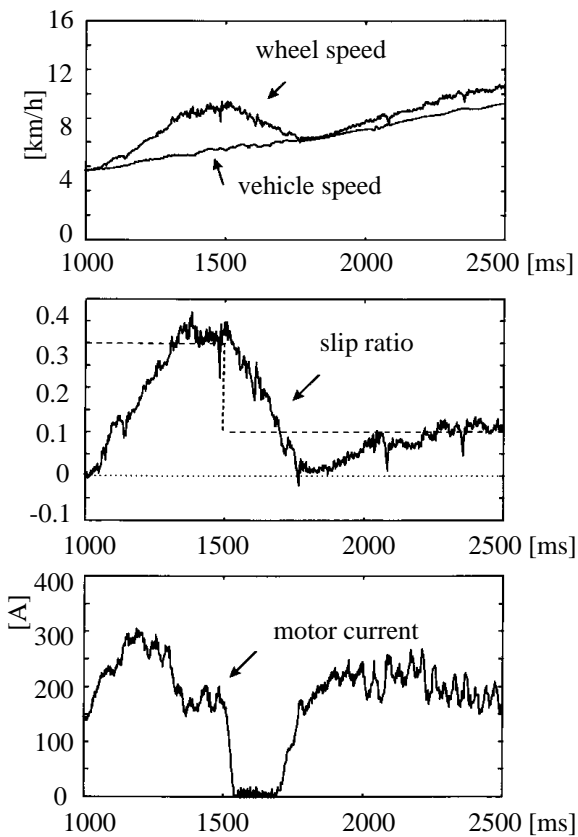
という特長もそなえた2輪ないし4輪駆動車を考える。

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、数10[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



(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

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、立かつ高速にフィードバック制御できると考えられる。

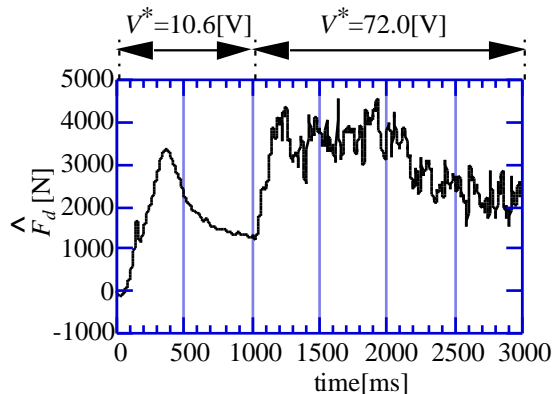


図10 駆動力オブザーバによる駆動力の推定結果 (\hat{F}_d が推定駆動力。 V^* はチョッパへの電圧指令である。)

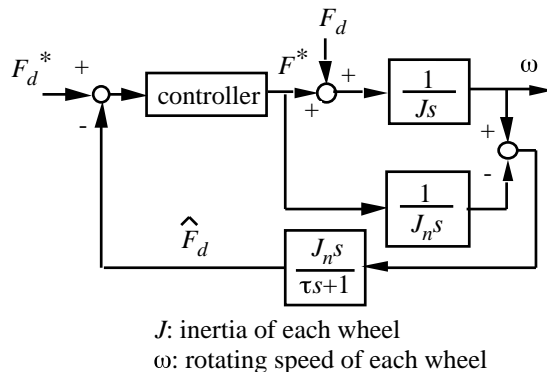


図11 新しいトルク制御系の構成

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比べてはるかに高性能な駆動力配分制御が可能になると考えられる。

さらに、インホイールモータなどを用いた車両では、左右で符合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を発生することができる。将来は、ヨーモーメント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、 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研究がある。)

オブザーバの設計には、たとえば文献[18]等でも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、 β 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。

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^{[18][19]}、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12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13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14～図18に示す。

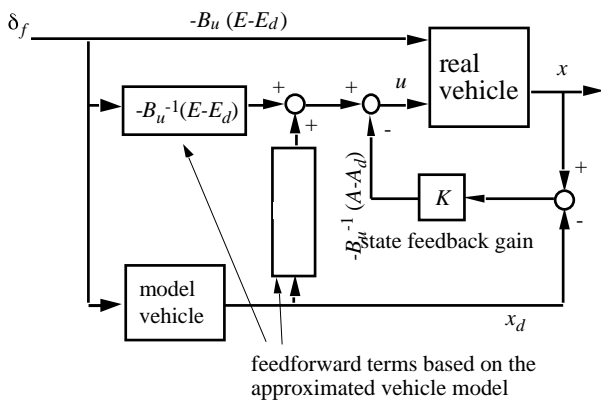


図12 モデルマッチング制御 (MMC)

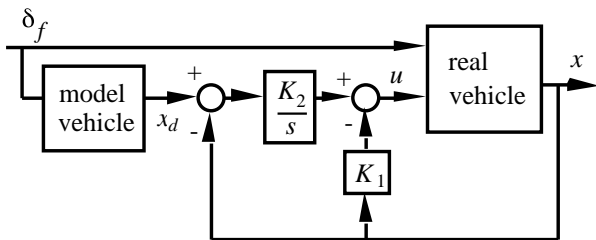


図13 定常特性を改良したモデルマッチング制御 (ロバストMMC)

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。

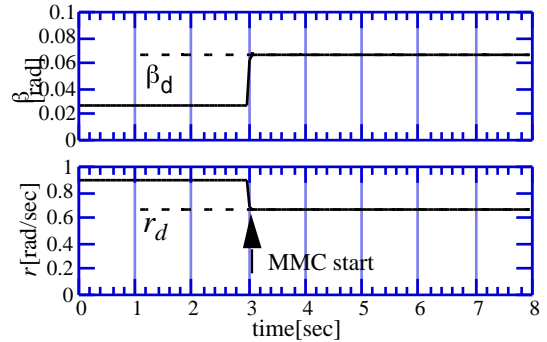


図14 MMCのシミュレーション結果
(誤差のない2輪線形モデルを使用)
(モデル誤差もないので定常偏差も生じない。)

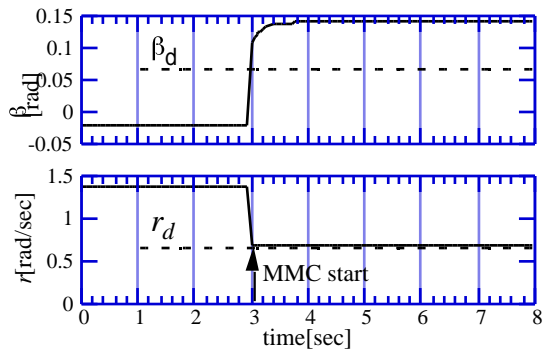


図15 MMCのシミュレーション結果
(2輪線形モデルを使用。ただし、コーナリング
ステイフネスに誤差を含んでいる。)
(モデル誤差のために定常偏差を生じている。)

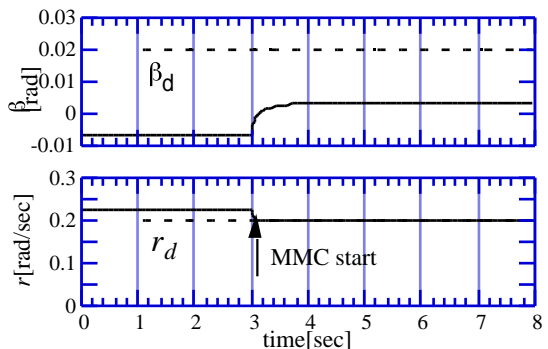


図16 MMCのシミュレーション結果
(誤差のない4輪非線形モデルを使用。)
(モデルの誤差はないが、非線形性の影響で
定常偏差を生じている。)

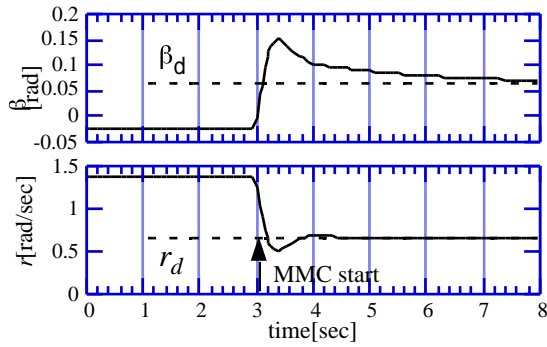


図 17 ロバストMMCのシミュレーション結果
(2輪線形モデルを使用。ただし、コーナリング
スティフネスに誤差を含んでいる。)
(モデル誤差を抑圧し、定常偏差は解消される。)

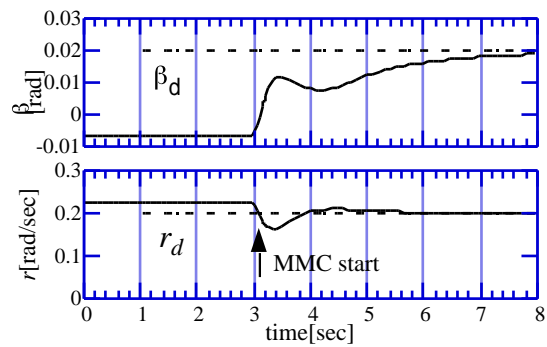


図 18 ロバストMMCのシミュレーション結果
(誤差のない4輪非線形モデルを使用。)
(非線形性を抑圧し、定常偏差は解消される。)

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。)

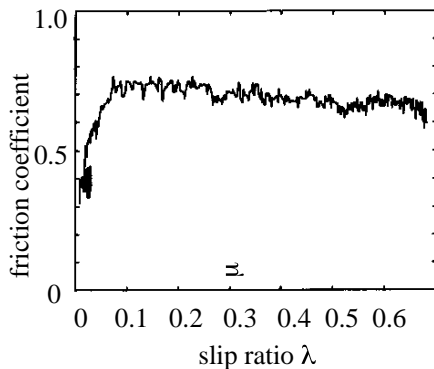


図 19 乾いた路面における
 μ - λ 曲線の推定結果 (実験)

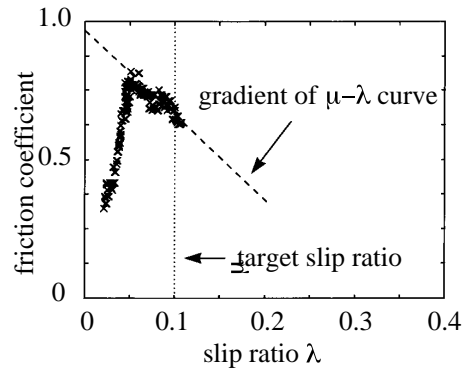


図 20 スリップ率制御をかけた状態での
 μ - λ 曲線の推定結果 (実験)

また、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、両分野の技術者の交流が期待される。

さらに、電気自動車をサイバネティック・スペースととらえれば、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、といった人間工学的な研究も興味深く、かつ重要なテーマであると考えている。[22][23][24]

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。また、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。併せて謝意を表したい。

参考文献

- [1] 伊藤他: トラクションコントロールシステムの現状と動向, 自動車技術, Vol.46, No.2, pp.32-37, 1992
- [2] 池田他: トラクションコントロールシステムの動向, 自動車技術, Vol.42, No.3, pp.336-341, 1988
- [3] 白石他: 駆動制御による望ましい車両運動制御について, 自動車技術, Vol.45, No.3, pp.96-105, 1991
- [4] 峯岸他: トラクションコントロールシステムの開発, 自動車技術, Vol.42, No.8, 1988
- [5] Kiyotaka Ise et al: The "Lexus" Traction Control (TRAC) System, SAE Paper 900212, pp.319-326, 1990
- [6] 藤田他: 車両総合制御システムの開発, TOYOTA Technical Review, Vol.43, No.1, 1993
- [7] 磯田他: 三菱トラクションコントロールシステムとシャシ総合制御, 三菱自動車テクニカルレビュー, No.3, pp.22-36, 1990
- [8] 古川: 車両運動性能, 自動車技術(年鑑), Vol.49, No.8, pp.148-151, 1995
- [9] 日本エービーエス株式会社編: 自動車用ABSの研究, 山海堂, 1993
- [10] 横浜ゴム株式会社編: 自動車用タイヤの研究, 山海堂
- [11] 酒井: タイヤ工学, グランプリ出版, 1987
- [12] T.Furuya, Y.Toyoda and Y.Hori: Implementation of Advanced Adhesion Control for Electric Vehicle, Proc. IEEE Workshop on Advanced Motion Control, Proc. AMC-Mie '96, Vol.2, pp.430-435, 1996

- [13] 古谷他: 電気自動車の増粘着制御 - 東大三月号 (UOT Electric March) の設計と制作 -, SEV研究発表会, 1995
- [14] 鶴岡, 豊田, 堀: スリップ率制御による電気自動車のトラクションコントロール, 平成9年電学全国大会, No. 983, 1997
- [15] 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, Vol.118-D, No.1, pp.45-50, 1998
- [16] Y.Hori, Y.Toyoda and Y.Tsuruoka: Traction control of Electric Vehicle based on the Estimation of Road Surface Condition, Proc. PCC-Nagaoka, Vol.1, pp.1-8, 1997
- [17] J. Ackermann: Yaw Disturbance Attenuation by Robust Decoupling of Car Steering, 13th IFAC World Congress, 8b-01-1, pp.1-6, 1996
- [18] 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, 電学論D, Vol.116, No.3, pp.279-284, 1996
- [19] 永井, 山中他: 後輪操舵と制動駆動力配分の統合制御の研究, 自動車技術会講演前刷集972, pp.29-32, 1997
- [20] U.Kienchke and A.Daiss: Observation of Lateral Vehicle Dynamics, Control Eng. Practice, Vol.5, No.8, pp.1145-1150, 1997
- [21] 安部: 自動車の運動と制御, 山海堂, 1992
- [22] 影山: 自動車の操縦性・安定性, 山海堂, 1992
- [23] 袖原: 人間オペレータの制御モデル, 日本機械学会第3回交通・物流部門大会, No.940-57, pp.21-28, 1994
- [24] 久岡他: ドライバにとって望ましい車両応答と操舵トルクに関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.4, pp.61-66, 1997
- [25] 坂井, 堀, 電気自動車の運動制御のためのモデルマッチング制御のロバスト化, 平10電学全国大会, 1998
- [26] 佐渡, 坂井, 堀, 駆動力オブザーバを用いた電気自動車の路面状態推定の実験的検討, 平10電学全国大会, 1998

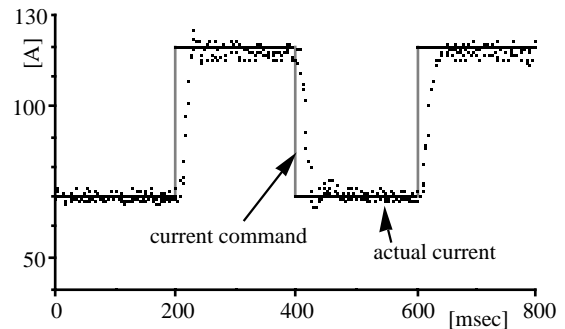
付表1 東大三月号の仕様

Conversion Base	Nissan March (Micra)
size	3785 × 1560 × 1395[mm]
weight	900[kg](batteries included)
Motor	Advanced D.C. Motors, Inc.
type	DC series wound
rated power (@120V)	19[kW](1hr.), 32[kW](5min.)
size/weight	φ 232, length 397[mm], 65[kg]
Controller	Curtis Instruments, Inc.
type	MOSFET PWM Chopper
operating frequency	15[kHz]
rated voltage/current	120[V]/400[A]
Battery	Japan Storage Battery Co.,Ltd. GTX-130E41L
type	lead acid
voltage/capacity	72[V]/92[Ah](5hr)
weight	27.5[kg] × 6
CPU	PC9801NS/T (386SL, 20MHz)
weight	3.2[kg]
A/D and D/A converters	12bit, 8ch / 12bit, 2ch

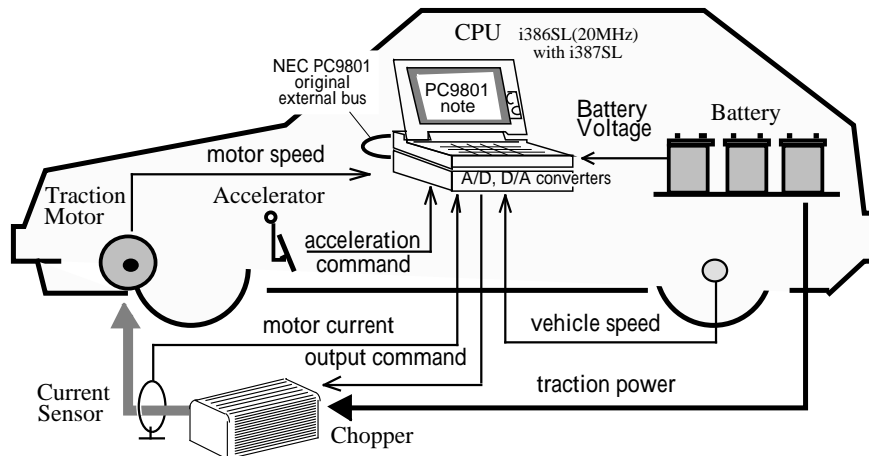
付録



付図1 東大三月号



付図3 電流制御系の応答



付図2 東大三月号の構成