

電気自動車制御技術の現況と革新に向けて

1998.9.18

東京大学大学院工学系研究科

電気工学専攻

堀 洋一

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大きな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（トラクション制御）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。

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ケタて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。クリントンの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輪独立駆動車で可能になる、動的駆動力配分制御や車両姿勢制御の可能性について述べる。

2. 新しい車体制御系の構想

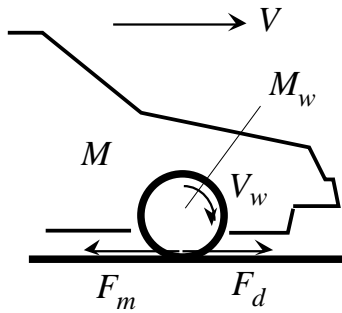
2.1 車両の運動方程式

本章では、われわれが実現しようと考えている、電気自動車ならではの車両運動制御の構想を述べる。

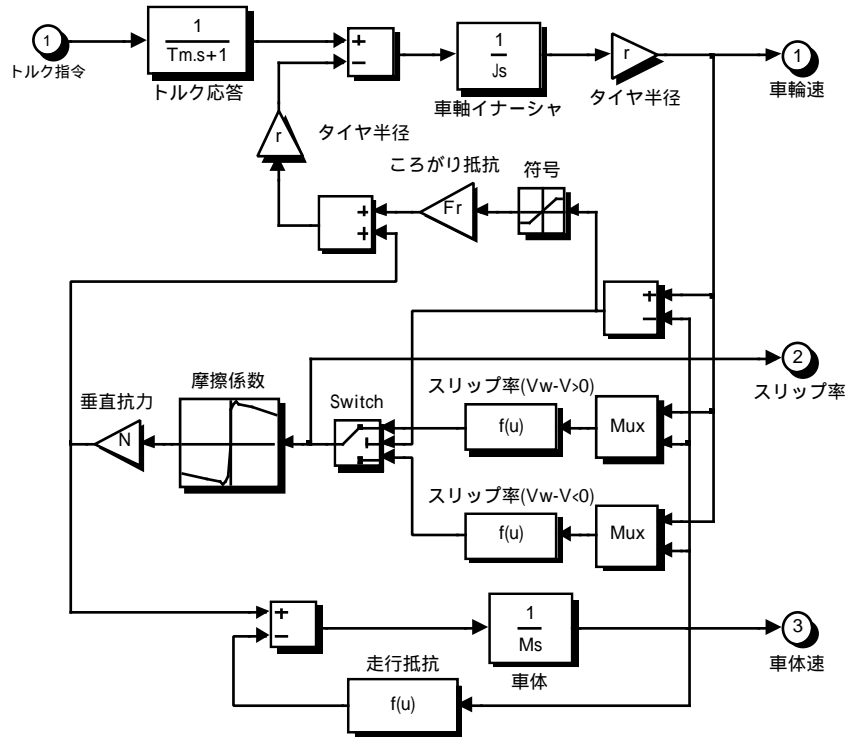
車両の運動は、前後方向の運動と、平面上の2次元運動に分けて考えてよく、それぞれに必要な知識としても以下の程度でよいと思われる。

(1) 前後方向の車両運動

まず、1輪の前後方向の運動解析には、タイヤと路面特性のモデル化が必要である。詳細は省略するが、その車両運動方程式は、図1のようなモデルとブロック図で表現することができる。ただし、車体速を決めるトルクは4輪を合計したものであり、車輪速は1輪ごとに独立に計算する必要がある。



(a) 前後方向の車両モデル



(b) ブロック図表現

図1 前後方向の車両モデルとそのブロック図

運動方程式は、

$$(F_m - F_d) \frac{1}{M_w s} = V_w \quad (1a)$$

$$F_d \frac{1}{M_s} = V \quad (1b)$$

で与えられる。ただし、

F_m : モータトルク (車輪の力換算) F_d : 駆動力
 M_w : 車輪慣性 (質量換算) M : 車両質量

である。

路面とタイヤの摩擦係数は、

$$F_d = N \mu(\lambda) \quad (2)$$

で与えられる。 N は、 $N=Mg$ で与えられる垂直抗力である。 $\mu(\lambda)$ は路面の粘着状態を表わす重要な非線形関数であり、これを $\mu-\lambda$ 曲線と呼んでいる。

(2) 2次元平面内での車両運動

2次元平面内での車両運動は基本的に非線形な運動であるが、いくつかの近似を用いることによって、すべり角 β とヨーレート r を状態変数とする線形状態方程式(2輪車両モデル)が得られる。

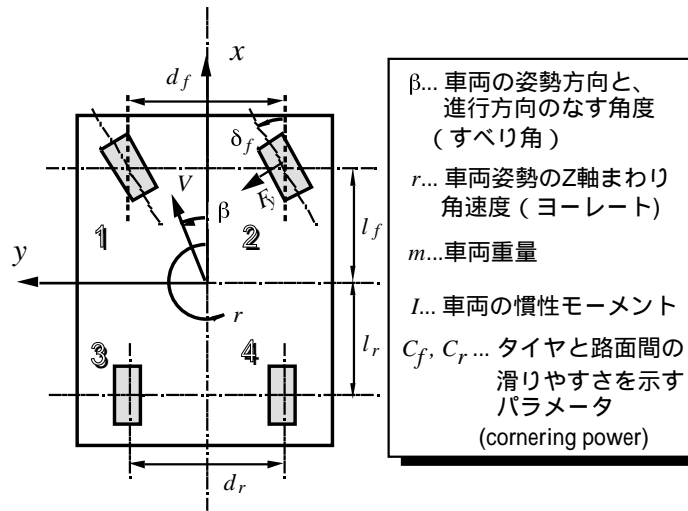


図2 車両運動方程式と座標系

状態方程式を書き下せば、以下のようになる。

$$\dot{x} = Ax + Bu + E\delta_f \quad (3)$$

$$x = \begin{pmatrix} \beta \\ r \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} \delta_r \\ N \end{pmatrix}, \delta_f \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix} -2 \frac{C_f + C_r}{mV} & -1 - 2 \frac{l_f C_f - l_r C_r}{mV^2} \\ -2 \frac{l_f C_f - l_r C_r}{I} & -2 \frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{IV} \end{pmatrix} \quad (5a)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{2C_r}{mV} & 0 \\ -\frac{2l_r C_r}{I} & \frac{1}{I} \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} \frac{2C_r}{mV} \\ \frac{2l_f C_f}{I} \end{pmatrix} \quad (5b), (5c)$$

ここで、 β は車両の姿勢方向と進行方向のなす角度すなわち(車両)すべり角、 r は車両姿勢の z 軸まわりの角速度すなわちヨーレートである。 m, I はそれぞれ車両重量と慣性モーメントを示す。

タイヤに発生する横力是一般に、各タイヤのすべり角 α の増加に応じて増加し、 α が大きくなるとやがて飽和するという非線形な特性を持っているが、上記の線形方程式では単に α に比例すると近似している。上式中の C_f, C_r がそれぞれ前輪後輪における比例係数であり、これは一般的にはコーナリングパワーと呼ばれる値である。

方程式を線形化するために用いた他の仮定は、車両速度 V が一定であること、車両すべり角 β と前輪実舵角 δ_f は十分小さいこと、各タイヤでの発生横力は左右で等しいことなどである。これらの近似を用いない場合、すべり角 β 、ヨーレート r および車体速 V を状態変数とする非線形の状態方程式となる。これについては、第4章でもう少し詳しく述べる。

2.2 新しい車両運動制御系の全体構想

図3に示すのは、新しい東大三月号で実現しようと考えている、われわれの構想を描いたものである。さまざまなところに2自由度制御の考え方が含まれていることが、見て取れるであろう。

F_{drive} と $\delta_{f,drive}$ は運転者からの指令である。姿勢制御系は、 β と r をある値 β^* と r^* に保とうとする。(第5章で述べる。)なお、 β^* と r^* は一定値として与えられることもあれば、さらに上位の制御系から出力されるものかもしれない。

姿勢制御系は制御出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。次に、 N^* と F_{drive} の指令値を満たすように4輪の駆動力が決められるが、要求2個に対して車軸トルクは4個とも独立であるため、そこには冗長性がある。そこで、たとえば動的駆動力配分制御などが可能である。(第4章で述べる。)

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、最終的な駆動力が決まる。増粘着制御などはここに組み込むことになる。(第3章で述べる。)

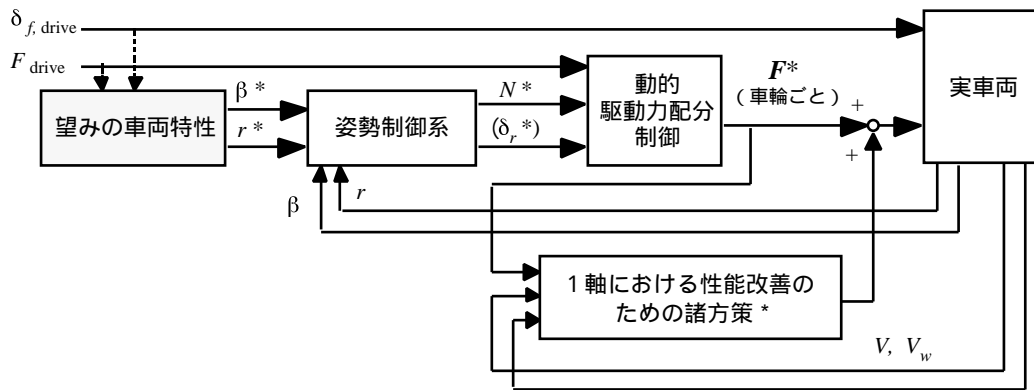


図3 提案する車両のモーション制御系

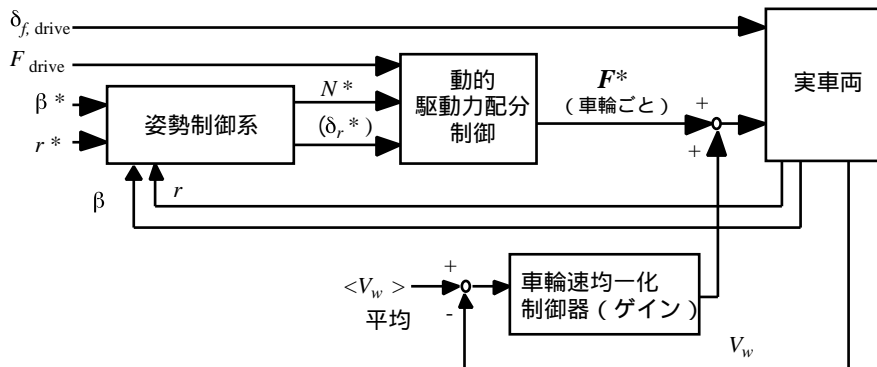


図4 車輪速均一化制御（1軸でのマイナーループ制御系の一例）

図4はもっとも簡単な最内側のマイナーループの例であり，ここでは4つの車輪速があまりかけ離れることがないように制御ループを付加したものである。この車輪速均一化制御は低ゲインを用いた弱いフィードバック制御であり，たとえば，ある車輪速だけが異常に上昇するのを防いだりできる。その制御特性は，この制御系のどの伝達関数とも独立に設定することができるし，人間の特性を考慮したりする必要はまったくないのである。

3. 前後方向におけるトラクション制御

図5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。

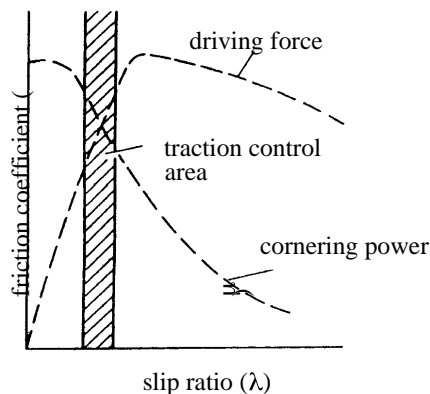


図5 タイヤと路面の摩擦特性

3.1 モデル追従制御

まず手始めに，図6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。実際には、車体モデルの積分とハイパスフィルタの微分は組で実装したり、ドライバトルクを増加させる方向の補正は行わないなどの工夫をしている。

図7は、MFCのマイナーループへの組み込み方法を示している。様々な制御系が図3の形で統一表現できるようであり、もっとも重要なのは内側のループである。電気自動車はこのループを持ちうるのである。

図8、図9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。

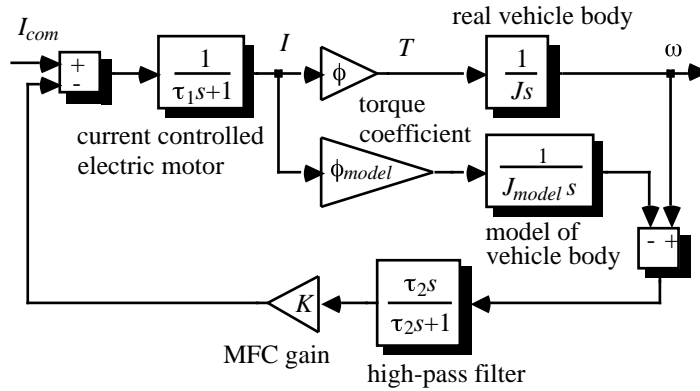


図6 モデル追従制御 (MFC)

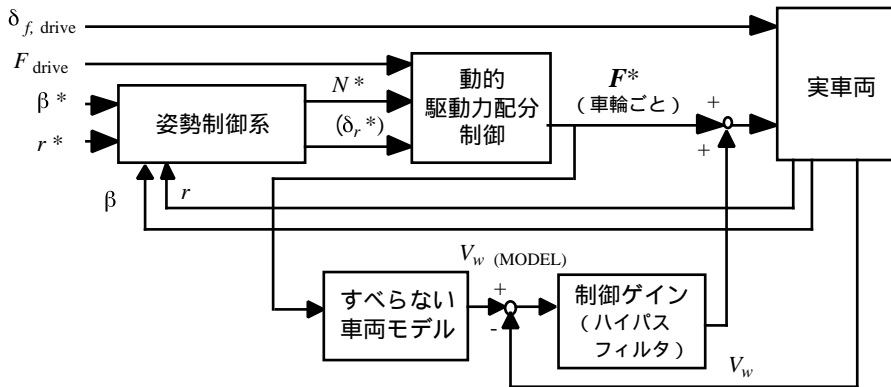


図7 モデル追従制御のマイナーループへの組み込み

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。

なお、このモデル追従制御は、絶対車速を知る必要がないので、とりあえず車速を知る必要があるスリップ率制御(後述)などに比べても、実現性に勝っているかもしれない。

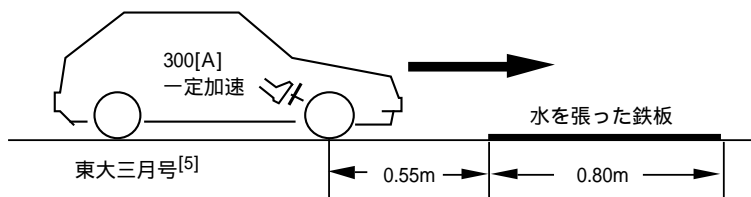


図8 スリップ実験

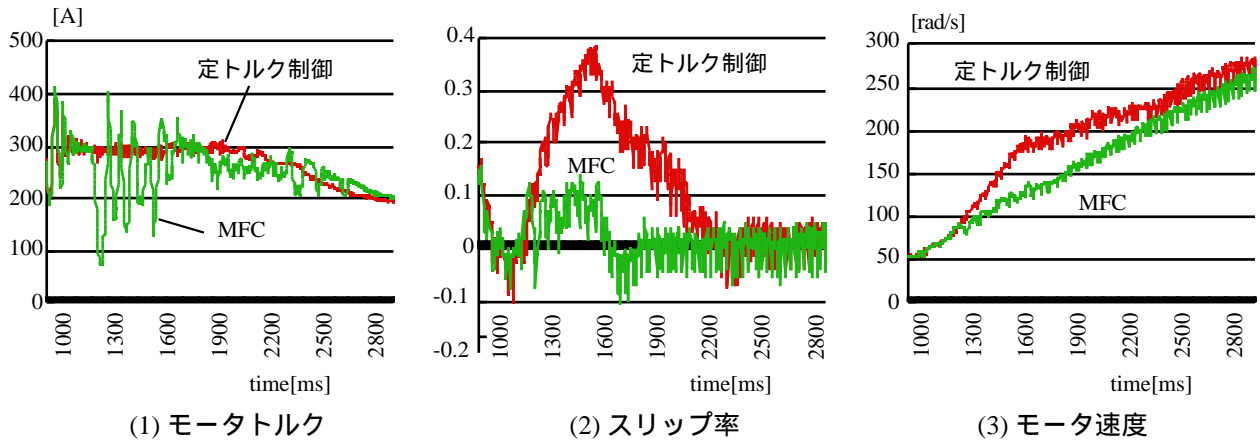


図9 定トルク制御とMFCの実験結果

3.2 最適スリップ率制御

図10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。

図1および式(1)(2)に示したタイヤと路面のモデルを線形化することによって、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ることができ、

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta F_m} = \frac{1}{Na} \frac{M(1-\lambda)}{M_w + M(1-\lambda)} \frac{1}{1+\tau s} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{1}{Na} \frac{MM_w V_{w0}}{M_w + M(1-\lambda)} \quad (7)$$

という、いっけん何の変哲もない一次遅れ系となる。

ただし、車体速度 (V_{w0}) や $\mu-\lambda$ 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もちており、とくに、 $\mu-\lambda$ 曲線のピークの右側では不安定なシステムとなる。

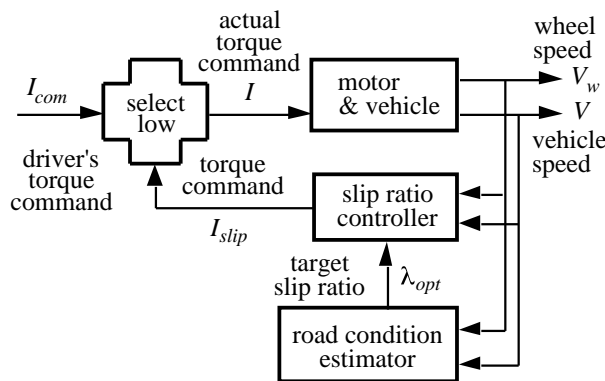


図10 路面状態推定にもとづく最適スリップ率制御

図11に、最適スリップ率制御のマイナーループへの組み込み方法を示す。最適スリップ率制御が、図3の意味において、マイナーループとして機能していることがわかる。

種々検討の結果、スリップ率制御器は、図12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、

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda^*} = \frac{1}{1 + Na \frac{M_w + M(1-\lambda)}{M(1-\lambda)} \frac{1}{K} s} \quad (8)$$

のようになる。

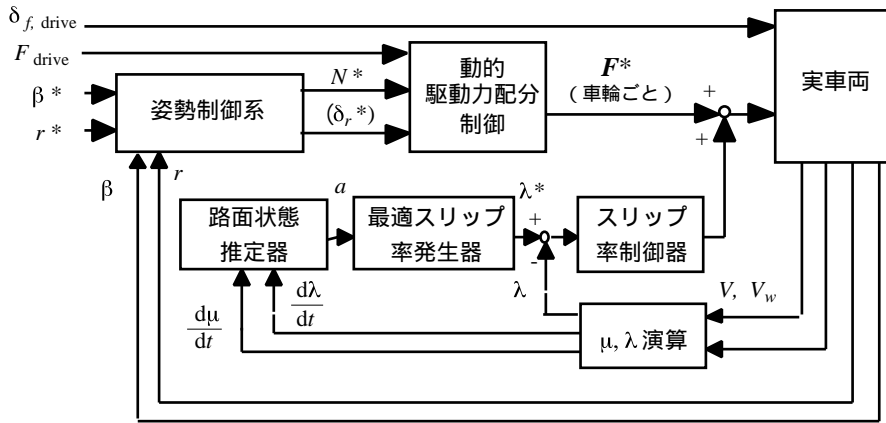


図 1 1 最適スリップ率制御のマイナーループへの組み込み

図 1 3 に、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 1 4 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と、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。

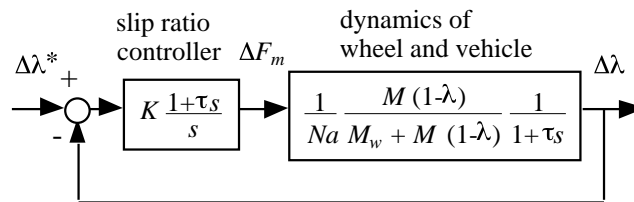


図 1 2 路面・タイヤの動特性（線形化モデル）とスリップ率制御器

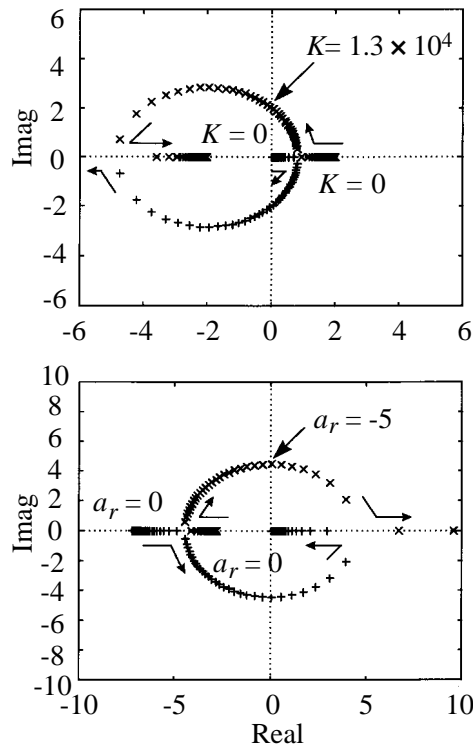


図 1 3 パラメータ変動に対する閉ループ系の根軌跡

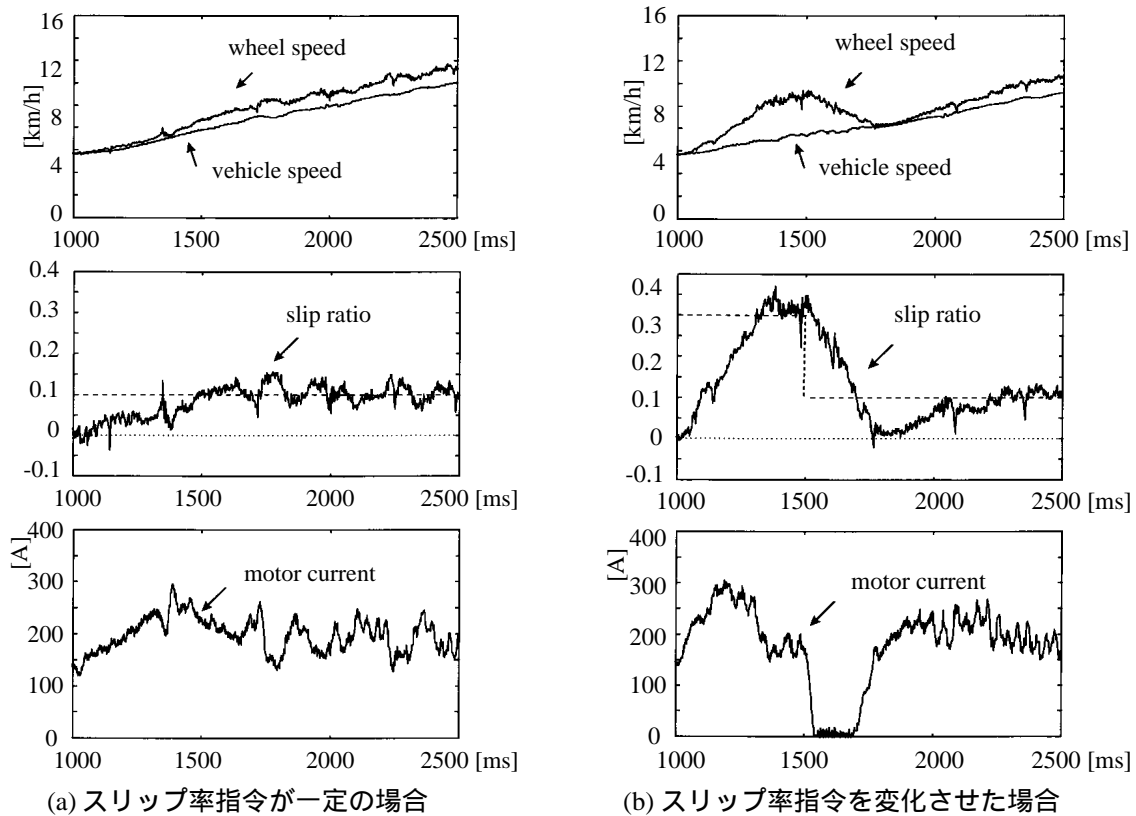


図 1 4 最適スリップ率制御の実験結果

3.3 路面状態推定

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 15、図 16 に、東大三月号を用いた基礎的な実験結果を示す。実用的なリアルタイムでの推定手法は現在研究中である。さらに、推定された路面状態から最適スリップ率の指令を与える部分は、人間の経験則や知識が役に立つと思われ、たとえばファジィ推論のような方法が適しているかもしれない。

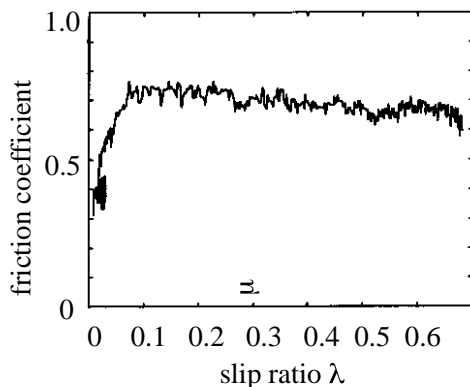


図 1 5 乾いた路面における μ - λ 曲線の推定結果 (実験)

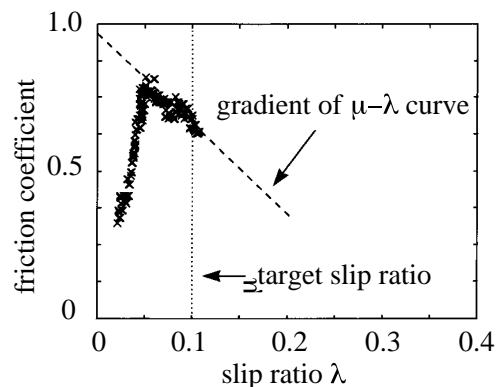


図 1 6 スリップ率制御をかけた状態での μ - λ 曲線の推定結果 (実験)

4. 動的駆動力配分制御

第 5 章で述べる姿勢制御系から出力されるヨーモーメント力を実現するために、各タイヤがどのような制駆動力を発生すればよいかという問題は、これまでまともには解かれていないようである。これは従来の ICV においては、各輪の制駆動力を高速かつ独立に制御することが難しいためである。

本章では、この問題、すなわち図 3 で動的駆動力配分制御と記したブロックにおいて、低 μ 路走行時の安全性確保などを念頭におき、各輪での発生力を動的に均一化するような制駆動力配分法について考える。

4.1 タイヤモデル

タイヤにおいて発生する横力 F_y は、タイヤのスリップ角 α に応じて非線形に変化する。ここでタイヤのスリップ角 α とは、タイヤの進む方向とタイヤ回転面とのなす角度である。前者は車体速（重心の並進速度） V とヨーレート r によって決定されるから、2輪車両モデルの前後輪における α は、

$$\alpha_f = \beta + \frac{l_f}{V} r - \delta_f \quad (9)$$

$$\alpha_r = \beta - \frac{l_r}{V} r \quad (10)$$

で与えられる。

α とともに横力 F_y がいかに変化するかを、比較的詳しい力学モデルから計算すると、図17(a)に太い実線で示した曲線のようになる。2輪車両モデル（式(3)~(5)）においては、これを点線のような直線

$$F_y = C \alpha \quad (11)$$

で近似したわけである。この比例係数が式(3)~(5)における C_f, C_r 、すなわち、コーナリングパワーと呼ばれる値であり、式(11)を線形タイヤモデルと呼んでいる。

もうすこし詳しい近似として、たとえば永井らは、

$$F_y = -C C_x \frac{\mu}{k} \tan^{-1}\left(\frac{k}{\mu} \alpha\right) \quad (12)$$

なる式を用いている。ただし、 μ は路面とタイヤ間の摩擦係数であり、 G_x, k は、 F_z をタイヤにかかる荷重力として、

$$G_x = \sqrt{1 - \left(\frac{F_x}{\mu F_z}\right)^2} \quad (13)$$

$$k = \frac{C\pi}{2F_z} \quad (14)$$

で与えられている。式(12)から計算される横力 F_y を μ をパラメータにして図17(a)に細線で示す。図から分かるとおり、 $\alpha = 0$ 付近で傾き C の直線に漸近し、 α が大きくなると飽和する特性を持たせている。本論文では、これを非線形タイヤモデルと呼ぶことにする。

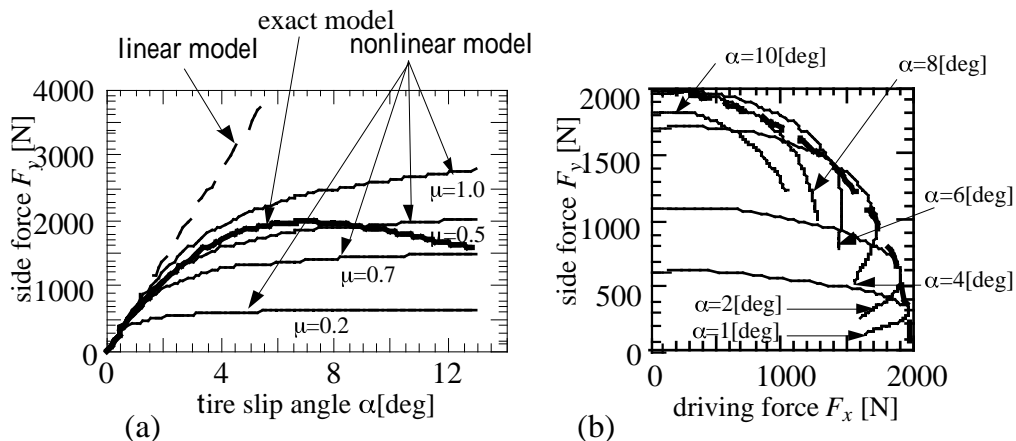


図17 タイヤで発生する横力とそのモデル

この横力の飽和特性は、路面摩擦係数や荷重力の他に、制駆動力 F_x にも依存する。その依存性の一例を図17(b)に示す。図はタイヤに発生する力（発生力と呼ぶ）が、

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq F_{\text{limit}} \quad (15)$$

なる円の内側になければならないことを示している。図に点線で示されたこの円は、一般に摩擦円と呼ばれている。これを越えるような力が発生した場合、タイヤはグリップを失った状態に陥ってしまい、きわめて危険である。

4.2 ヨーモーメント力制御による車両運動制御

ここでは、制駆動力の動的配分法の提案と、そのシミュレーションを行うが、シミュレーションのためにはヨーモーメント力指令を生成するなんらかの姿勢制御系が必要である。われわれも、第5章において、モデルマッチング制御のロバスト化という手法を提案するが、従来からいくつも提案がある。

本節では岩間らの提案している制御則を用いたので、その概要をここで簡単に説明しておく。提案されている制御則は、前輪実舵角 δ_f からヨーレート r までの伝達関数 $G(s)$ が

$$G(s) = \frac{r}{\delta_f} = \frac{K_f}{1 + T_f s} \quad (16)$$

になるような、ヨーレート r のフィードバック制御である。ヨーレートはジャイロセンサなどを用いれば検出可能としている。

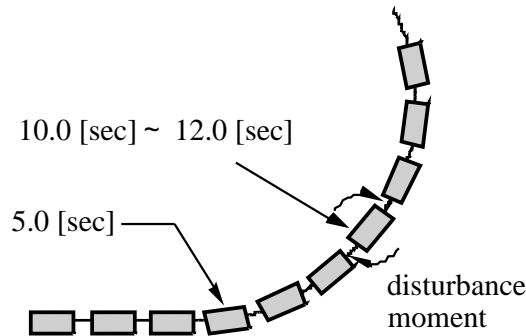


図18 ヨーモーメント力制御のシミュレーション条件

制御系の設計は車両運動の線形モデルを用いて行われる。詳細は省略するが、この制御によって、目標値応答(式(16))の指定はもとより、横風などの外乱に対するロバスト性の向上も実現できることが示されている。

図18のように、時刻 $t=5[s]$ においてステップ状に前輪舵角が与えられ、時刻 $t=10[s]$ から2秒間、車両を回転するような外乱が加わった(このようなヨーモーメント力を与える外乱は、真横から横風が加わった場合にも発生しうる。)場合のシミュレーションを行ってみる。

車両運動のシミュレーションに際しては、2輪車両モデルの基本式に非線形タイヤモデルを4輪分組み合わせたものを用いた。2次元平面内の運動のみを考え、車体のロールやピッチは考慮していない。車体速は $V=50[km/h]$ で一定とした。これらの条件は以降のシミュレーションでも同様である。

図19に、このシミュレーションから得られた、 β と r の時間応答を示す。図から、ヨーレートフィードバックによる外乱抑圧特性の向上が理解できる。同様の効果は、同グループによって実車を用いた実験的によっても確認されている。

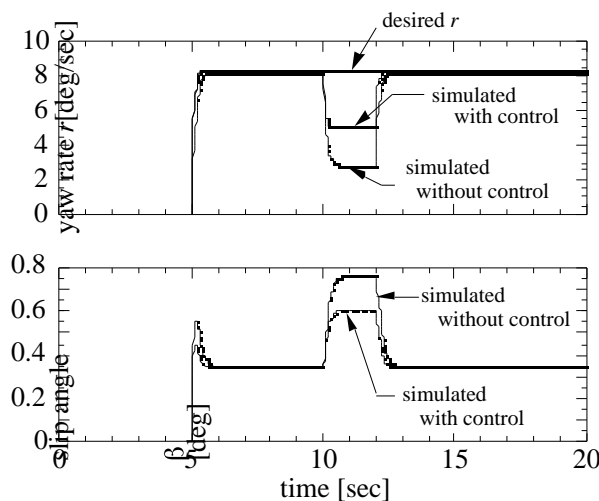


図19 ヨーレートフィードバックのシミュレーション結果

4.3 動的最適駆動力配分法の提案

前節のような車両運動制御手法を実現するためには、指令されたヨーモーメント力を発生するために、適切な制駆動力配分を行う必要があり、図3で駆動力配分制御と記したブロックがこの役割を担っている。

そこで決定される制駆動力は、まず以下の二式を満たす必要がある。

$$F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} = F_{drive} \quad (17)$$

$$-\frac{d_f}{2} F_{x1} + \frac{d_f}{2} F_{x2} - \frac{d_r}{2} F_{x3} + \frac{d_r}{2} F_{x4} = N^* \quad (18)$$

ただし、 F_{xi} は各輪における制駆動力である。添字の番号は図2に示したとおり、左前輪、右前輪がそれぞれ1, 2, 左後輪と右後輪がそれぞれ3, 4である。(同様に、各輪で発生している横力を F_{yi} と書く。ここでは各輪の横力は既知としておく：後述。) d_f, d_r はそれぞれ前輪、後輪における左右輪間隔であり、トレッドと呼ばれる量である(図2参照)。 F_{drive} は総駆動力または総制動力であり、操縦者のアクセル指令ないしブレーキ指令によって決定される。

2輪の独立駆動によってヨーモーメント力を発生する場合は、たとえば、上式で $F_{x1}=F_{x2}=0$ などとするれば F_{x3} と F_{x4} を一意に求めることができる。しかし、ここで想定している4輪独立駆動車では式(17)(18)のみでは方程式が不足しており、冗長な系となっている。

そこで、この冗長性を活かした駆動力の動的配分法が考えられる。たとえば低 μ 路を安全に旋回するようなことを想定すると、式(15)で説明したとおり、すべてのタイヤで横力と制駆動力の二乗和がある限界値以下である必要がある。左右で μ の異なるいわゆるスプリット μ 路や、旋回による荷重変動を考えなければ、この限界値は各輪でほぼ同じ値であり、従って発生力 F_i の最大値が最小化された状態が望ましい走行状態であると考えられる。

この問題は、式(17)(18)を制約条件とし、

$$\max F_i \quad \min \quad (19)$$

を評価関数として $F_{x1} \sim F_{x4}$ を求める最適化問題に帰着される。しかも F_{yi} が刻々変化することを考えると、この問題は制御周期ごとに、高速に解かなければならない。

そこで、この問題の高速近似解法として、下記の方法を提案する。いま、必要な総制駆動力とヨーモーメント力指令を $(F_{drive}, N^*)^T$ を、

$$\begin{pmatrix} F_{drive} \\ N^* \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} F' \\ 0 \end{pmatrix} + (1-a) \begin{pmatrix} 0 \\ N' \end{pmatrix} \quad (20)$$

のように、二つのベクトルの線形結合として与えることにする。ただし、 $F' = N' = |F_{drive}| + |N^*|$ である。

ここで、 $(F' \ 0)^T$ に対する解を F_x^0 、 $(0 \ N')^T$ に対する解を F_x^1 とすると、

$$F_x = a F_x^0 + (1-a) F_x^1 \quad (21)$$

なる関係、すなわち、目的関数についての解の線形性を仮定する。明らかにこれは正しい仮定ではないが、この仮定が近似的によい解を与えることは数値計算で確認することができる。

以下、詳細は略するが、左前輪と右前輪、左後輪と右後輪で発生する横力はそれぞれ等しいと仮定すれば、解 F_x^0, F_x^1 は容易に求めることができるので、あとは式(20)に従って各輪軸の駆動力を決めればよい。この手法は非常に計算量が少ないものになる。

なお上記の計算においては、各輪で発生している横力を知る必要がある。横力は、線形タイヤモデルを仮定すれば、式(9)~(11)を用いて、すべり角 β とヨーレート r から求めることができる。ヨーレート r はジャイロセンサ等で検出でき、すべり角 β の検出も適当なオブザーバによって行えることがKienckeらによって報告されているので、実際にはこれを用いればいいことになる。

4.4 提案手法の数値計算例

本節では、提案の動的駆動力配分法を、数値計算例によって検証する。

横力、制駆動力、発生力は左後輪の横力で規格化された値を用いる。また、トレッドは前輪における値で規格化した。

$F_{drive} = -5.0, N^* = 5$ とし、左右の横力が等しい場合、すなわち、

$$F_{y1} = F_{y2} = 2.0 \quad (22), \quad F_{y3} = F_{y4} = 1.0 \quad (23)$$

$$d_f = 1.0 \quad (24), \quad d_r = 0.9 \quad (25)$$

である場合について計算した F_x^0 と F_x^1 を図 2 0 に示す。実際の制駆動力は、この両者を線形補間して得ることになる。

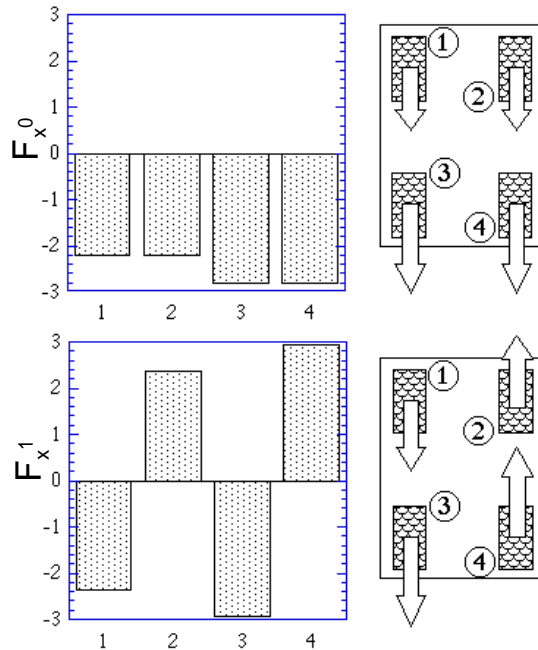


図 2 0 左右の横力が等しい場合の両端解

$F_x^0 : (F^0 \ 0)^T$ に対する解

$F_x^1 : (0 \ N)^T$ に対する解

つぎに、提案手法の効果を、制駆動力を各輪に均等配分した場合と比較してみよう。

均等配分時の解 ($F_{i, \text{even}}$ とする) は、式(17)(18)を $F_{x1}=F_{x3}$, $F_{x2}=F_{x4}$ という条件のもとで解いて得られる。ここで提案手法の評価量として、

$$\eta = \frac{\max F_i}{\max F_{i, \text{even}}} \quad (26)$$

を計算してみる。 η が 1 より小さいほど、提案手法の効果が大きいことになる。

$F_{\text{drive}} = N$ の場合について η を計算した例を図 2 1 に示す。図 2 2 には、図 2 1 中の A, B, C 点における制駆動力および発生力の様子を示す。図中の実線が提案の制駆動力配分法で得られた η である。 F_{drive} や N が小さく、発生する制駆動力が横力に比べて小さい場合は改善効果が小さい (A 点) が、必要な制駆動力が増加するに従って (A ~ B 点)、提案手法の改善効果が顕著になる様子が見られる。さらに制駆動力が大きくなると、制駆動力に対する横力の比が小さくなるため、提案手法の効果は小さくなっていく (C 点)。この結果から、たとえば、旋回中に制動を行い、横力と制駆動力が同程度の大きさをもつような場合に、提案手法が効果を発揮することが理解される。

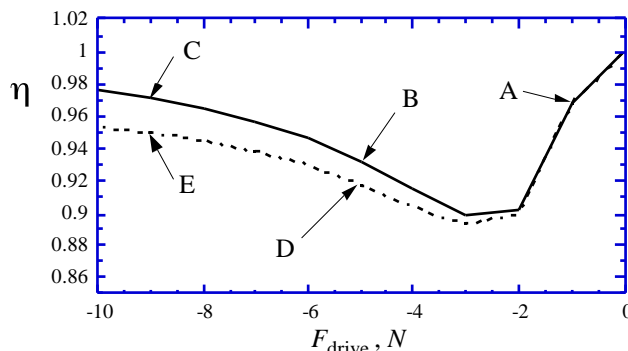


図 2 1 提案手法による改善効果 (実線: 近似解, 点線: 厳密解)

ここでは $F_{drive} < 0$ すなわち制動時のみの結果のみを示したが，駆動時についても同様の結果となる。
 なお，図中の点線は，数値計算によって求めた厳密な最適解の場合の改善効果 η をプロットしたもので，当然近似解法よりよい結果となるが，その差はきわめて小さいことがわかる。

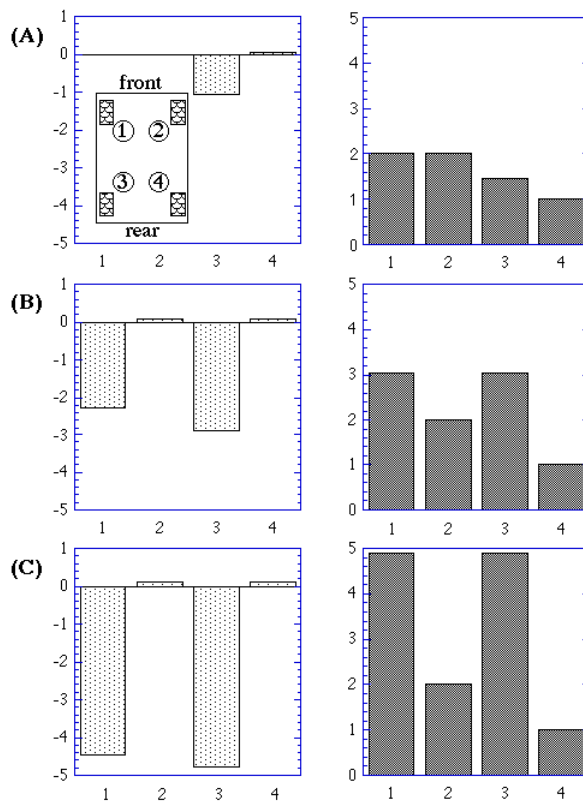


図 2.2 図 2.1 のA,B,C点における各軸の制駆動力および横力

また，図 2.3 は，さまざまな F_{drive} と N^* の組み合わせに対する提案手法の改善効果 η を，3次元プロットで示したものである。提案手法の効果を図から理解することができる。

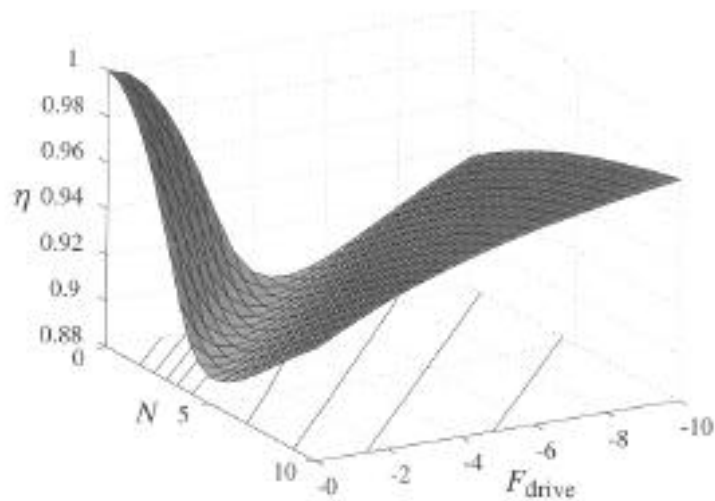


図 2.3 さまざまな F_{drive} ， N の組み合わせに対する改善効果 η

なお，ここまでの計算は左右輪の発生横力が等しいことを仮定していたが，左右の横力が等しくない場合についても計算を行い，提案手法が有効であることを明らかにしている。ただしこれは，駆動力を均等に配分した場合との比較であり，当然の結果である。左右の横力が等しくない場合については，さらなる最適配分を行う余地があり，今後の課題としたい。

4.5 シミュレーション結果

本節では、提案する動的駆動力配分法の効果をシミュレーションによって示す。シミュレーションには、適当な姿勢制御系が必要であるが、ここでは岩間らのコントローラを再び用いる。

図24は、単に4輪に均等な制駆動力を与えた場合の、各輪の横力 F_{yi} 、制駆動力 F_{xi} 、タイヤの発生力 $F_i = \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}$ の時間変化を示したものである。 $t=5[s]$ においてステップ状の前輪舵角が与えられるため、これに対応して急峻な制駆動力が発生している。 $t=10[s] \sim 12[s]$ においては外乱モーメント力が生じるため、これを抑圧するためのヨーモーメント力指令が与えられる。図からわかるように、単に均等に制駆動力を配分した場合には、各輪の発生力は不均一になってしまう。

これに対し、図25は、本節で提案した動的駆動力配分法のシミュレーション結果である。発生している横力に応じて駆動力が最適配分されるため、タイヤの発生力が均一化され、発生力の最大値が押さえられていることがわかる。

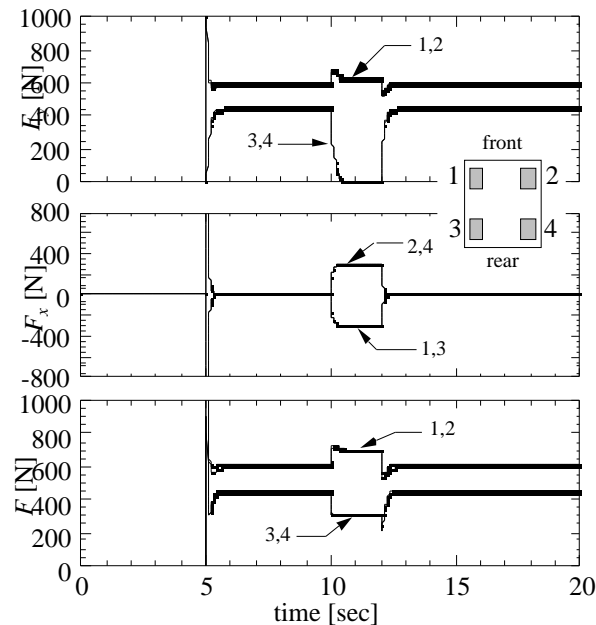


図24 横力 F_{yi} 、制駆動力 F_{xi} 、発生力 $F_i = \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}$ の時間変化
(均等な制駆動力を与えた場合)

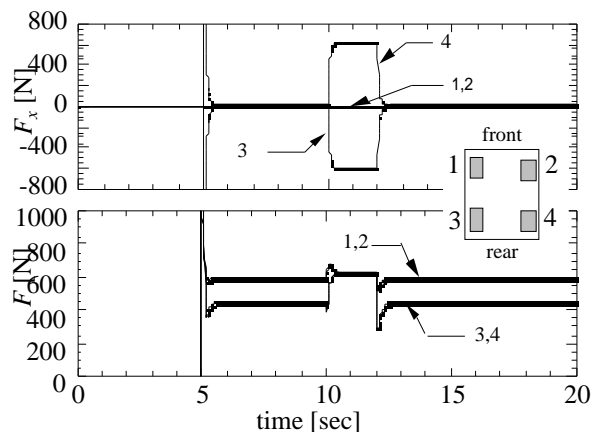


図25 横力 F_{yi} 、制駆動力 F_{xi} 、発生力 $F_i = \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}$ の時間変化
(提案の動的駆動力配分制御)

以上のように、提案手法によれば、各輪の発生力が均一化され、タイヤがグリップを失うまでの余裕を最大化することができる。この効果は、現在制作中の電気自動車によって、実験的にも検証する予定である。

なお、実際には、車両のロールやピッチの影響でタイヤの荷重力が不均一なものになる。たとえば旋回中は外側のタイヤに大きい荷重がかかっているため、外側のタイヤに大きな制駆動力を配分することが望ましい。今後の課題としたい。

5. 姿勢制御系

図3において姿勢制御系と記した部分は、速度やヨーレート、車両すべり角、操縦者の与えた舵角などから、発生すべきヨーモーメント力 N^* と後輪舵角 δ_r^* を決定する制御器である。(4.2もその一例である。)

車両運動のフィードバック制御としては、Ackermannのヨーレートフィードバックに関する研究が有名であり、内燃機関の自動車(ICV)においても、たとえばLSD(Limited Slip Differential Gear)などの機械的な機構を用いて左右の駆動力差を得て、これにより車両運動の制御を行うものなど多くの研究例がある。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い。

5.1 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26に推定結果の一例を示す。

なお、東大3月号では、モータから駆動輪までの間に存在する軸系の共振や、トランスミッションの非線形要素のため、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新しい東大3月号では、これらの要素は存在しないため、より高性能な駆動力オブザーバが構成可能である。その結果、図27のようなトルク制御系によって、タイヤ・路面系の強い非線形性を吸収し、各輪の駆動力を直接、独立かつ高速に制御できると考えられる。

このような駆動力制御の適用によって、たとえば第4章で述べたような駆動力配分制御を、さらに高性能化できると考えられる。

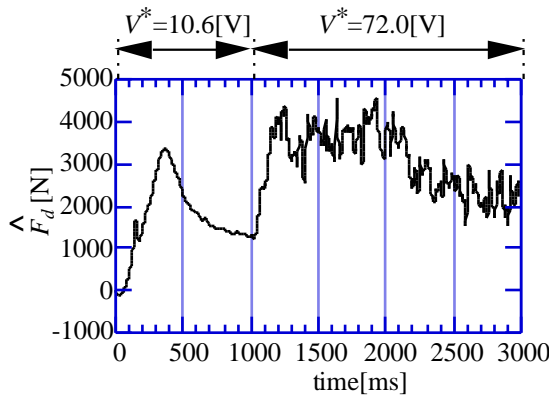


図26 駆動力オブザーバによる駆動力の推定結果

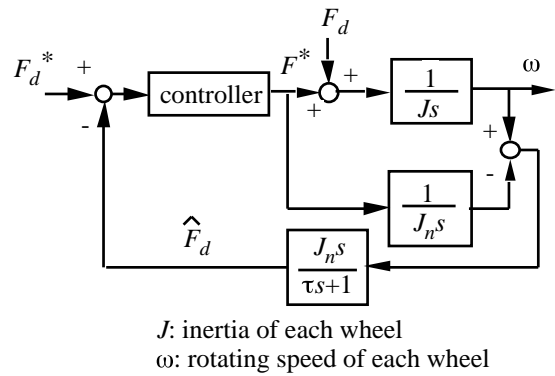


図27 新しいトルク制御系の構成
(F_d^{\wedge} が推定駆動力。)

5.2 モデルマッチング制御とそのロバスト化

すべり角 β を推定す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。

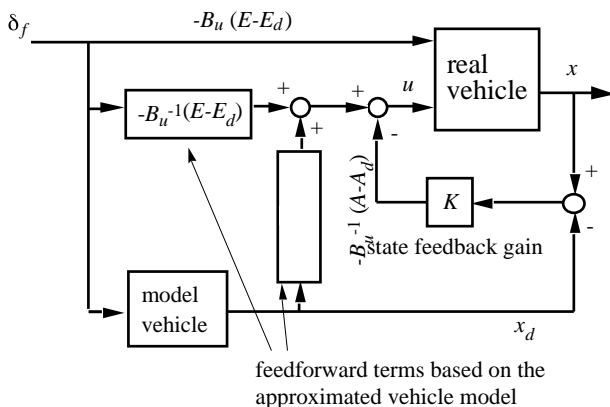


図28 モデルマッチング制御(MMC)

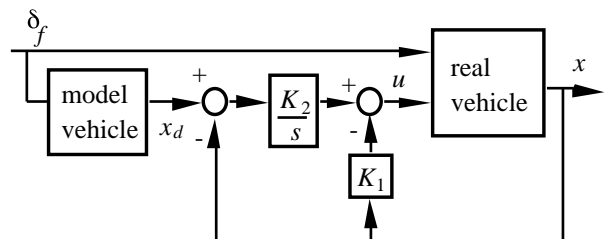


図29 定常特性を改良したモデルマッチング制御
(ロバストMMC)

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28のようなモデルマッチング制御を提案している。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。

なお、本節のシミュレーションでは、制御入力として、ヨーモーメント力 N^* と後輪舵角 δ_r^* の2つを用いている。

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、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のである。

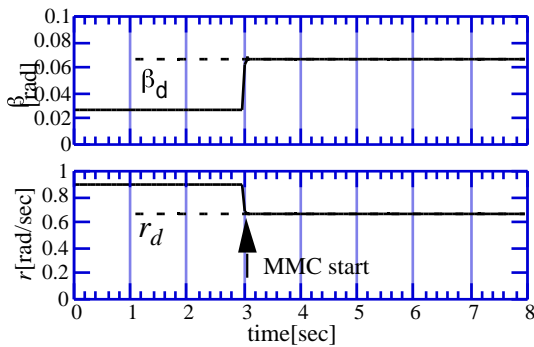


図30 MMCのシミュレーション結果
(誤差のない2輪線形モデルを使用)
(モデル誤差もないので定常偏差も生じない。)

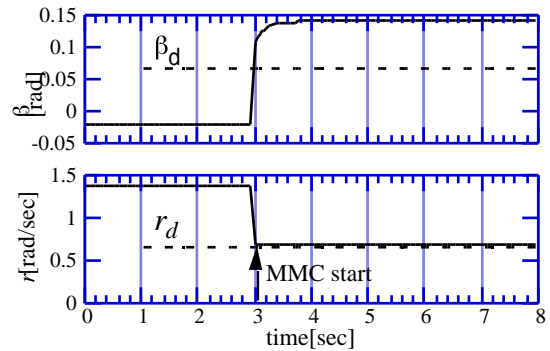


図31 MMCのシミュレーション結果
(2輪線形モデルを使用。ただし、コーナリング
パワーに誤差を含んでいる。)
(モデル誤差のために定常偏差を生じている。)

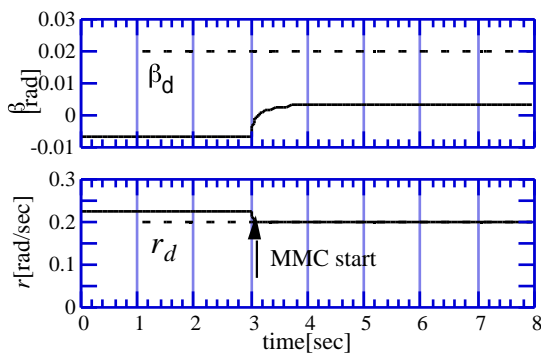


図32 MMCのシミュレーション結果
(誤差のない4輪非線形モデルを使用。)
(モデルの誤差はないが、非線形性の影響で
定常偏差を生じている。)

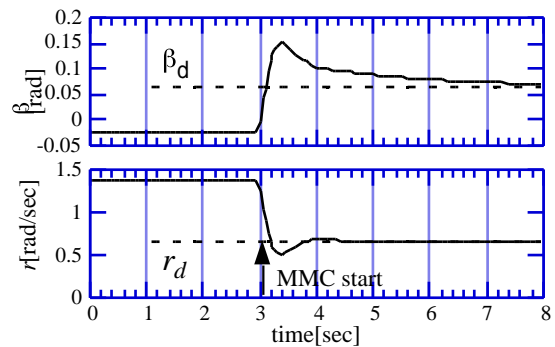


図33 ロバストMMCのシミュレーション結果
(2輪線形モデルを使用。ただし、コーナリング
パワーに誤差を含んでいる。)
(モデル誤差を抑圧し、定常偏差は解消される。)

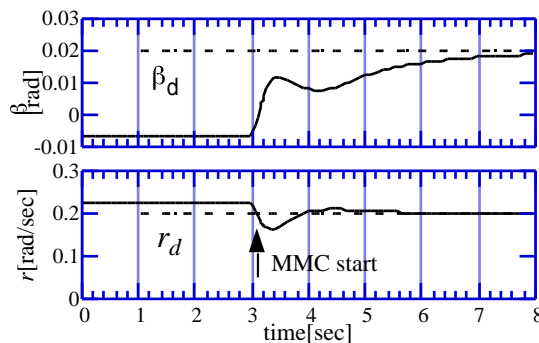


図34 ロバストMMCのシミュレーション結果
(誤差のない4輪非線形モデルを使用。)
(非線形性を抑圧し、定常偏差は解消される。)

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28のような制御系では定常偏差を生じ、望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29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30～図34に示す。

6. 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1軸での増粘着制御の試み、動的駆動力配分制御、モデルマッチング制御のロバスト化など、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、両分野の技術交流に一役買うことができるであろう。

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。その制御ループは、図3に示したように、人間自体の特性を考慮しながら設計された、姿勢制御系のさらに外側につくループということになるのであろう。多くの若い研究者の参入を期待する。

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（現他分野の博士1年）、佐渡秀夫（当研究室修士1年）らが当研究室において行ったものである。第4章および第5章の理論展開とシミュレーションは、坂井真一郎（当研究室博士2年）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

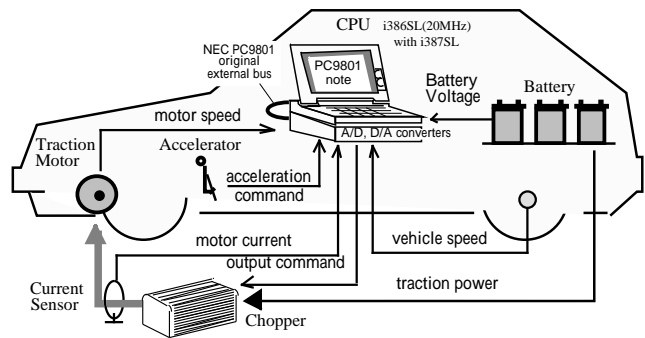
- [23] 柚原: 人間オペレータの制御モデル, 日本機械学会第3回交通・物流部門大会, No.940-57, pp.21-28, 1994
- [24] 久岡他: ドライバにとって望ましい車両応答と操舵トルクに関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.4, pp.61-66, 1997
- [25] 坂井, 堀: 電気自動車の運動制御のためのモデルマッチング制御のロバスト化, 平10電学全国大会, 1998
- [26] 佐渡, 坂井, 堀, 駆動力オブザーバを用いた電気自動車の路面状態推定の実験的検討, 平10電学全国大会, 1998
- [27] 堀: 電気自動車の増粘着制御の構図と展望, 電気自動車研究会第38回研究会, 1998
- [28] S.Sakai and Y.Hori: Robustified Model Matching Control for Motion Control of Electric Vehicle, 5th International Workshop on Advanced Motion Control, No. 98-025, 1998
- [29] 坂井, 内田, 堀: 4輪独立駆動電気自動車におけるヨーモーメント力制御のための動的駆動力配分法, 平成10年電気学会産業応用部門全国大会, No.282, 1998
- [30] 岩間, 稲熊, 浅野他: 車両のアクティブ制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, pp.844-853, No.7, 1997
- [31] 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, Vol.51, No.111, pp.11-18, 1997
- [32] 梅野, 堀: 2自由度ロバストサーボ系の構成とマンピュレータの運動制御への応用, 電気学会論文誌D, 110-D, 11, 1163-1170, 1990
- [33] 菅井, 志村, 堀: ロボットマンピュレータのための2自由度力制御器の提案, 電気学会論文誌D, Vol.111-D, No.10, pp.895-896, 1991

付録

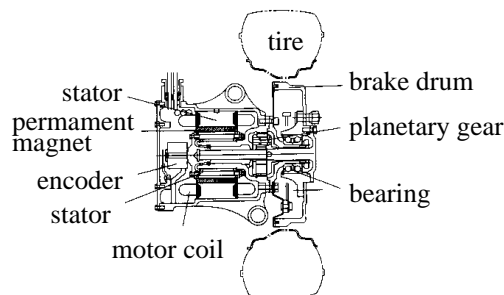
(筆者の研究室で制作している車両)



付図1 東大三月号 (1号車)



付図2 東大三月号 (1号車) の構成



付図3 製作中の東大3月号 (2号車, 4輪独立駆動車) と駆動用モータ

本稿は筆者らの著した, 文献[27]堀, 電気自動車の増粘着制御の構図と展望, 電気自動車研究会第38回研究会, 1998 などをもとに字句を修正し, 第2章, 第4章を加筆したものであることを申し添えます。