

MFCによる4WD-EVの増粘着制御シミュレーション

堀 洋一（東京大学）

Simulation of MFC-Based Adhesion Control of 4WD Electric Vehicle

Yoichi Hori (University of Tokyo)

Abstract: The most distinct advantage of electric vehicle (EV) is in its quick and precise torque generation. Our final goal is to realize a high performance 4 wheel driven (4WD) EV with vehicle dynamics control. As an important part of this project, we propose the advanced adhesion control technique based on the model following control, whose basic effectiveness is already shown by using the test vehicle. In this paper, I will show some advanced simulation results of what may happen when we apply this technique to 4WD EV.

キーワード：電気自動車，モーションコントロール，トラクションコントロール，モデル追従制御
(electric vehicle, motion control, traction control, model following control)

1. 電気自動車の魅力

電気自動車では電気モータの特長を生かさなければ意味がない。静的な効率マップなどで比べたり，クリーンさを売りものにしたりしていると，早晚ガソリン車に負けるようになるだろう。

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

という点である。エンジンが500msならモータは5msである。アクチュエータが速いとフィードバック制御が可能になり，人間から見た駆動特性（目標値応答）を変えることなく，車輪がスリップしたときのトルクの垂下特性（外乱応答）だけを調整したりできるようになる。（2自由度制御という。）

つぎに，

自分の発生するトルクが正確に把握できる

という点で，これをいかせば，タイヤの発生している駆動力や制動力を容易に推定でき，路面摩擦係数の実時間同定が簡単にできるようになる。この情報は直ちにトラクションコントロールに用いることができるし，すべりやすい路面ではドライバに警告を出したりすることも可能になる。

さらに，

モータは分散配置してもコスト高にならない

ので，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，ガソリン車にはできない高度なモーションコントロールが可能になる。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可能であろう。

このような制御の世界にこそ，電気自動車ならではの魅力が存在する。遠からず人々はこれに気がつき，電気自動車の高性能制御の時代が必ずやってくる。図1に示すのは，4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高性能EV東大三月号IIの概念図である。また図2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。

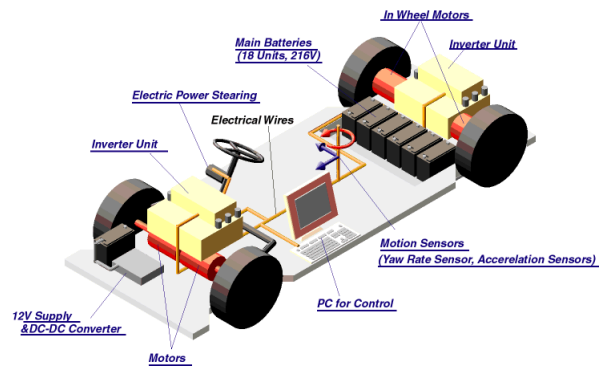


図1 東大三月号IIの概念図

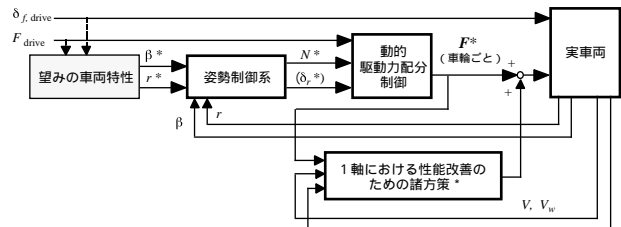


図2 4輪独立駆動車によるモーション制御系の構成

車体のダイナミクスは，車両速度，すべり角，ヨーレート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が提案されている。

図2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は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、MFCや最適スリップ率制御など、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、ガソリン車には絶対まねのできない制御となる。

図3に示すように、電気自動車はまさに電気・機械複合系であり、さらに人間・機械複合系でもある。加減速を含む全領域での粘着制御は電気自動車において初めて可能になる。摩擦係数の小さいタイヤで走行できれば、エネルギー消費を節約できる。

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が可能になる。

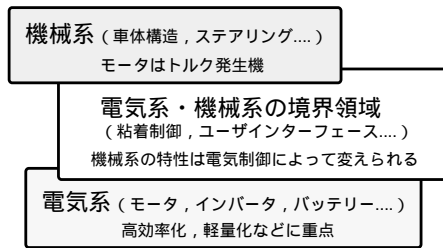


図3 EVは電気・機械複合系

2. 路面摩擦力関数

電気自動車のダイナミクスは、前後方向と横方向とに分けられる。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コントロール、ブレーキ時のものをABS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できる。

タイヤと路面の摩擦特性（図4）には、前後方向、横方向ともに適度な摩擦係数をもつスリップ率の範囲がある。この範囲にスリップ率を保ったり、決してその右側に出たりすることのない制御を行うことも可能であり、盛んに研究されている。

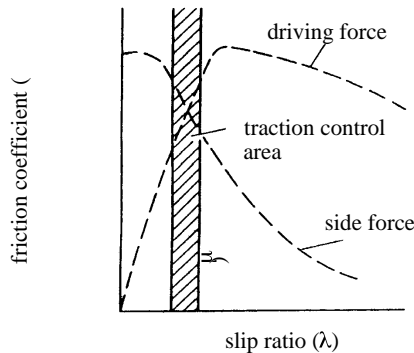


図4 路面摩擦力関数 $\mu(\lambda)$ の概形

横方向についても旋回安定性の改善などを目的として、ヨーレート制御、モデルマッチング制御、駆動力配分制御などの検討が行われている。

3. モデル追従制御（MFC）と基本実験

1輪でのスリップ防止制御を目的としたモデル追従制御（MFC）は、図5に示すように、すべらない車両モデルと実際の車輪速を比較してフィードバックする非常に簡単なものである。

図6、図7に初代の東大三月号を用いて行った実験とその結果を示す。電気モータの制御によって、タイヤはたしかにすべりにくくなることが確認できる。タイヤのすべりにくさはゴムの材料で決まると思っている人には、不思議な結果であろう。

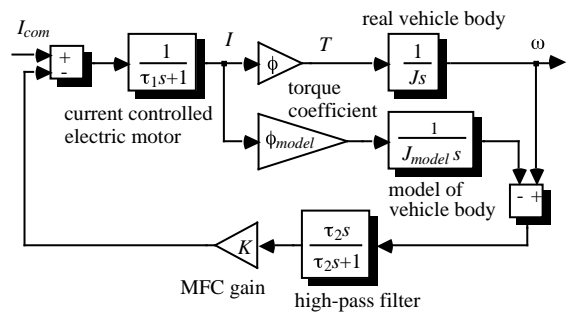


図5 モデル追従制御（MFC）の基本形

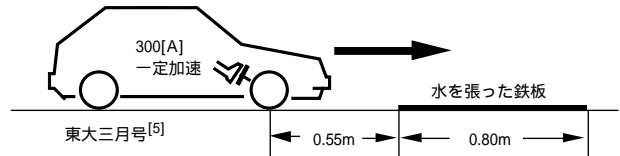


図6 スリップ実験

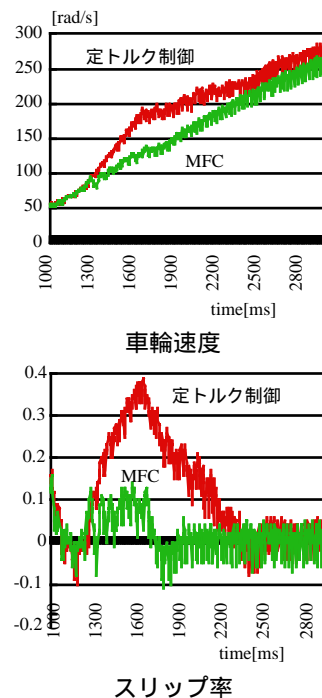


図7 定トルク制御とMFCの実験結果

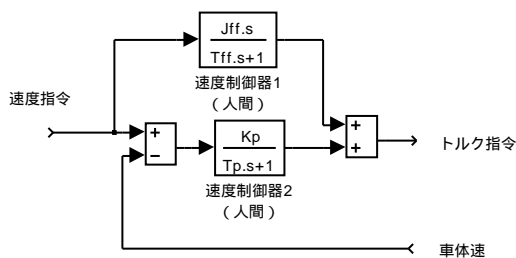
4. モデル追従制御 (MFC) のシミュレーション

4.1 運転者のモデル

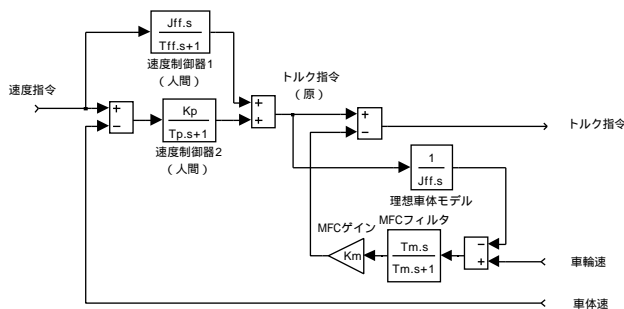
MFCを車輪に施し、車両がどのような挙動をするかをシミュレートするにあたり、運転者のモデルを考える必要がある。基本的には、運転者は速度制御器の役割をすると考える。

運転者は、頭の中で作る速度指令をもとにトルク指令を作り、アクセルペダルを操作する。ほとんどフィードフォワード制御であるが、メータやまわりの景色などから推定する車体速と速度指令の差にもとづいた弱いフィードバックがかかっていると考えられる。

比較する二つの制御方策 (電流制御とMFC) とあわせてブロック図に描けば、図8のようになる。



(a) 電流制御のみによる駆動制御 (通常の電気自動車)



(b) MFCによる駆動制御

図8 比較する二つの運転制御法

(a)の電流制御のみによる駆動制御では、トルク指令はそのままモータトルクとなる。すべりやすい路面に入っても指令トルクがそのまま実現されるため、大きなスリップを発生する可能性がある。(b)のMFCによる駆動制御では、すべらない理想的な車体モデルから出力されるモデル車輪速と、実際の車輪速の差にもとづいて、指令されたトルクを減ずるようなフィードバック制御 (MFC) が行われる。

たとえばすべりやすい路面に突入すると、トルクは急激かつ高速に垂下特性を示し、スリップは小さい範囲に抑えられる。この効果は、駆動時、制動時を問わず同じはずである。

4.2 車両のモデル

前後方向のタイヤに働く力は図9(a)で与えられ、次の2本の運動方程式で表現することができる。

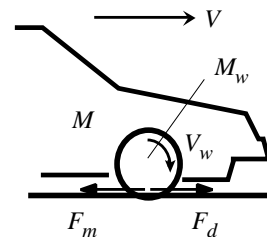
$$(F_m - F_d) \frac{1}{M_w s} = V_w \quad (1)$$

$$F_d \frac{1}{M s} = V \quad (2)$$

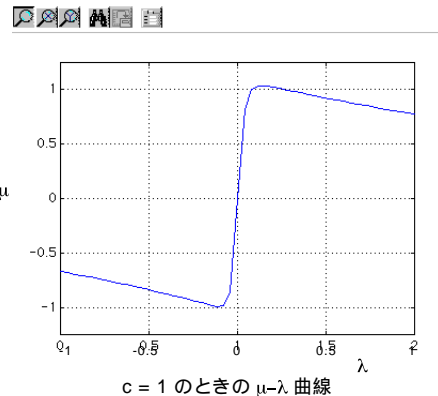
ここに、 F_m はモータトルク、 F_d は摩擦力 (すなわち車体の制駆動力)、 M_w はホイールの慣性、 M は車体重量、 N は $N=Mg$ で与えられる垂直抗力である。摩擦力は N と路面摩擦力関数 $\mu(\lambda)$ の積で、

$$F_d = N \mu(\lambda) \quad (3)$$

のように与えられる。路面摩擦力関数 $\mu(\lambda)$ のことを μ - λ 曲線と呼び、タイヤのスリップ率 λ の非線形関数である。さらに、路面によって大きく変動する。



(a) 1輪のモデル



(b) μ - λ 曲線

図9 タイヤモデルと μ - λ 曲線

スリップ率は、

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{V_w - V}{V_w} & : & \quad V_w \quad V \\ \lambda &= - \frac{V - V_w}{V} & : & \quad V \quad V_w \end{aligned} \quad (4)$$

で定義される。駆動時と制動時で異なることに注意されたい。

μ - λ 曲線としては、magic formula とよばれるモデル式が知られている。ここでは、

$$\begin{aligned} \mu &= -c \times 1.1 (e^{-35\lambda} - e^{-0.35\lambda}) & : V_w < V \\ \mu &= c \times 1.05 (e^{45\lambda} - e^{0.45\lambda}) & : V < V_w \end{aligned} \quad (5)$$

とした。図9(b)はこれを描いたものである。cは道路の種類によって、 μ - λ 曲線全体の形を比例的に変化させるためのパラメータである。

4.3 1輪のダイナミクス

以上をまとめると、図10に示す1輪ダイナミクスモデルが出来る。

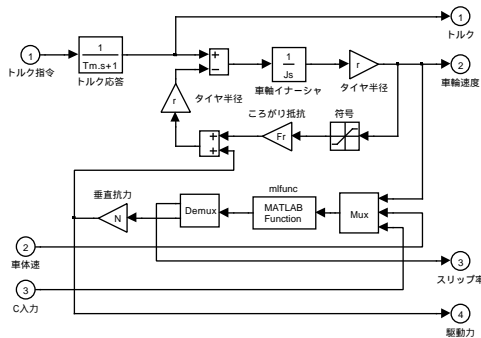


図10 1輪ダイナミクス

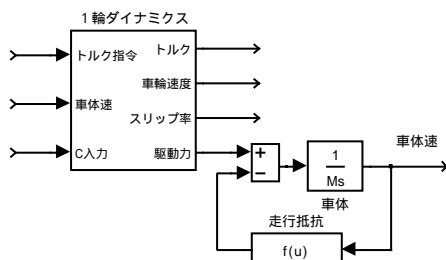


図11 車体ダイナミクス

本稿のシミュレーションでもっともやっかいなのは、(4)式のスリップ率の計算で頻繁に起こるゼロ割の回避である。いろいろ試みた結果、車体速、車輪速と小さな値(ここでは0.001)を比較し、その最大値で割算を行うのが良い。具体的には図10のMATLAB function部分で下記のとおりである。減速時に車輪速は負にもなりうる(たとえば $V > 0 > V_w$)が、それを考慮してもこれで良さそうである。

```
%---- slip ratio & m-l curve ----
% u(1): wheel speed u(2): vehicle speed
% u(3): coeff. of m-l curve
% y(1): slip ratio l
% y(2): friction coeff. m
function [y] = mfunc(u)
y(1) = (u(1)-u(2))/max([u(1),u(2),0.001]);
if u(1) >= u(2)
y(2) = -u(3)*1.1*(exp(-35*y(1))-exp(-0.35*y(1)));
else
y(2) = u(3)*1.05*(exp(45*y(1))-exp(0.45*y(1)));
end
```

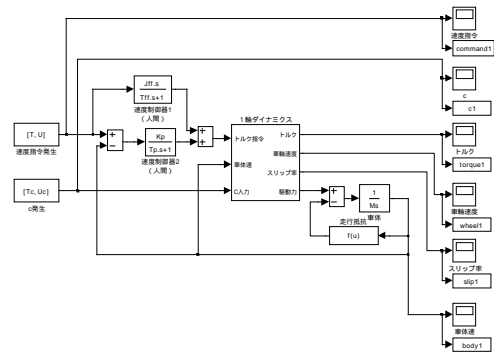
以上をまとめ、車体ダイナミクスは図11で与えられる。走行抵抗は、実測にもとづき、

$$f = 0.552 * V^2 \quad (6)$$

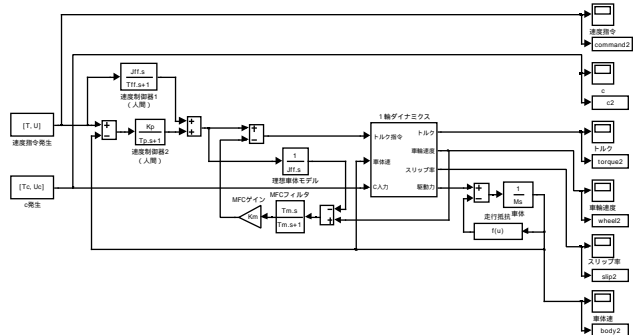
とした。

4.4 1輪のシミュレーション

以上述べてきた要素をまとめると、1輪のシミュレーションブロック図が得られる。図12(a)は電流制御のみによる駆動制御系、(b)はMFCを用いてスリップ防止制御を行った場合のシミュレーションブロック図である。



(a) 電流制御のみによる駆動制御系



(b) MFCによる駆動制御系

図12 1輪のシミュレーションブロック図

システム定数、制御定数を与えるm-fileは下記のとおりである。(実車の数値をもとにしている。)

```
%parameters (1 axis)
%vehicle
Tm = 0.02;
J = 21.1;
r = 0.26;
N = 6000;
M = 1000;
Fr = 10;
%driver's action
Kp = 1;
Tp = 0.2;
Jff = (M*r^2+J)/r;
Tff = 0.2;
%MFC controller for minor loop
```

```

Km = 5000;
Tm = 0.2;
%speed command
T = [0 10 20 30 40]';
U = [0 10 10 0.1 0.1]';
%friction-slip curve parameter change
c0 = 0.8;
c5 = 0.12;
Tc = [0 5 5.001 15 15.001 25 25.001 35 35.001 40]';
Uc = [c0 c0 c5 c5 c0 c0 c5 c5 c0 c0]';

```

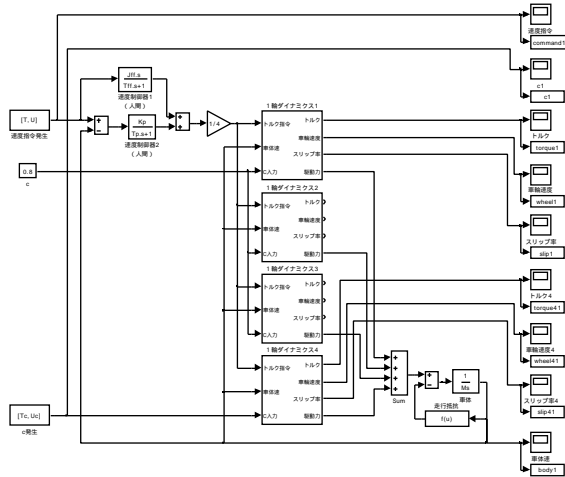
```

%parameters (4 axis)
%vehicle
Tm = 0.02;
J0 = 21.1;
J = J0/4;
r = 0.26;
N = 6000/4;
M = 1000;
Fr = 10/4;
%driver's action
Kp = 1;
Tp = 0.2;
Jff = (M*r^2+J0)/r;
Tff = 0.2;
%MFC controller for minor loop
Km = 5000;
Tm = 0.2;
%speed command
T = [0 10 20 30 40]';
U = [0 10 10 0.1 0.1]';
%friction-slip curve parameter change
c0 = 0.8;
c5 = 0.12;
Tc = [0 5 5.001 15 15.001 25 25.001 35 35.001 40]';
Uc = [c0 c0 c5 c5 c0 c0 c5 c5 c0 c0]';

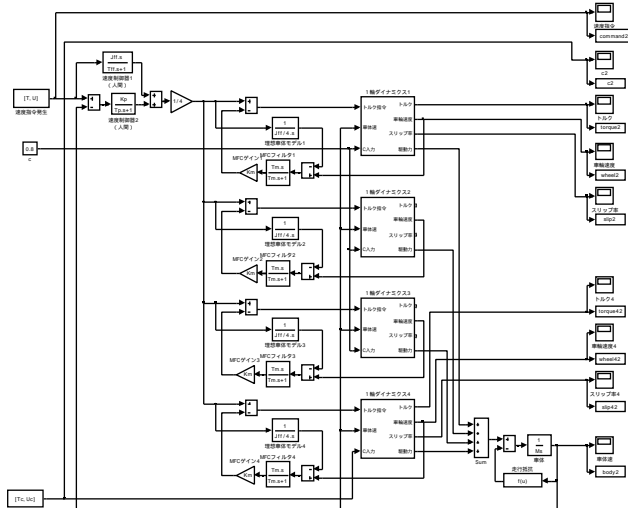
```

4.5 4輪のシミュレーション

同様に4輪駆動車のシミュレーションは図13で行う。ここでは、第4輪のみがすべりやすい路面に出たり入ったりするとした。



(a) 電流制御のみによる駆動制御系



(b) MFCによる駆動制御系

図13 4輪のシミュレーションブロック図

システム定数，制御定数を与えるm-fileは下記のとおりである。4輪駆動のため，いくつかの定数を4倍，あるいは1/4倍している。

5. シミュレーション結果と考察

シミュレーションでは，加減速中に μ - λ 曲線のパラメータ c を変化させて，乾燥アスファルト面($c=0.8$)と雪道($c=0.12$)を出たり入ったりするような状況を模擬している。

図14に1輪でのシミュレーション結果を示す。4輪が同じ挙動を示し，一緒にすべりやすい路面に出たり入ったりすると考えればよい。

電流制御のみの場合，加減速時に粘着の悪い路面にさしかかるとタイヤは大きくスリップする。その結果十分な制駆動力が得られなくなるので，車体速も指令から外れるようになる。これは減速時においてより顕著に観測され，十分な制動ができないことがわかる。

これに対し，MFCを施した系では，すべりやすい路面に入るとモータトルクが適度な垂下特性を示してスリップも効果的に防止されるため，車はかえって迅速に停止することがわかる。

次に，図15に4輪のシミュレーション結果を載せる。すべりやすい路面に入った第4タイヤにおいてはMFCによって駆動力が垂下特性を示し，スリップが防止されることがわかる。

興味深いのは，第4輪がスリップ防止制御を行ったために不足する車両の駆動トルクを，残りの3輪がほぼ1/3ずつ負担していることである。(図16に拡大図を示す。)

このような機能が各輪独立にもうけた個別のMFCによって，いわば自律分散的に達成されるということは，今回のシミュレーションによって初めて明らかになったことである。

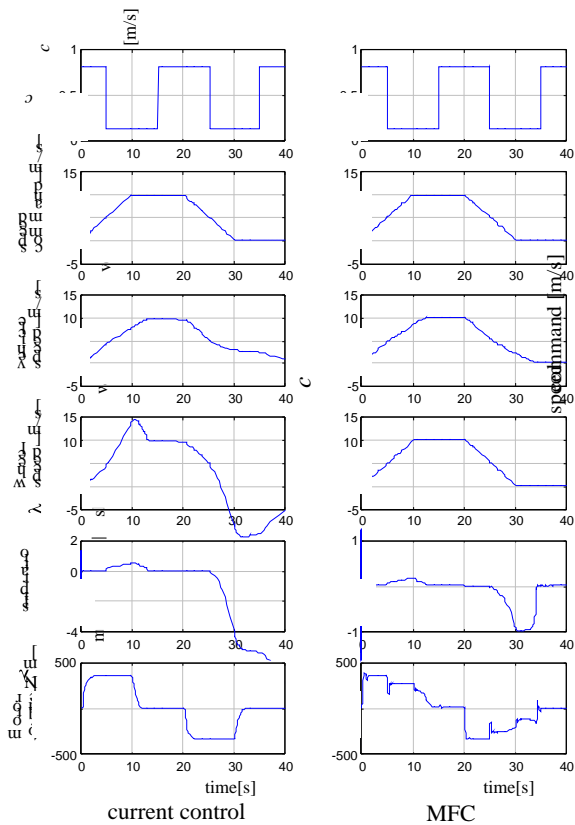


図 1 4 1 輪でのシミュレーション結果

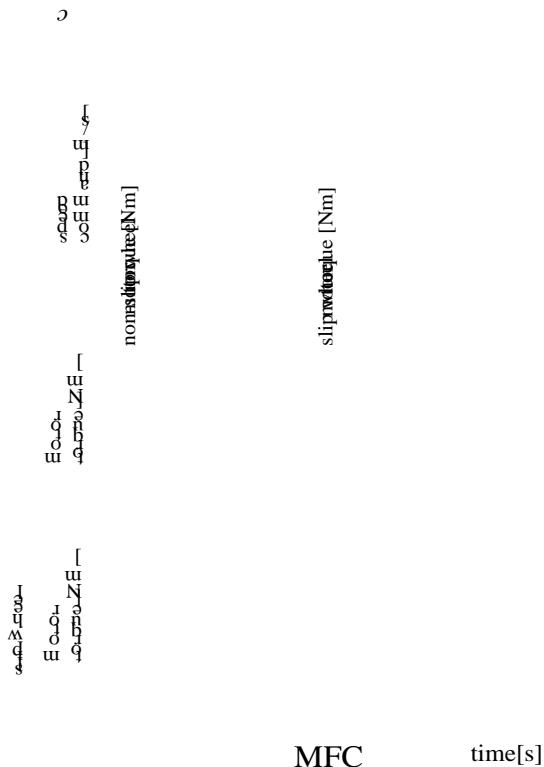


図 1 6 4 輪でのシミュレーション結果

(図 1 5 で、路面関数の係数c, 速度指令, すべらない車輪のトルク, すべる第 4 輪のトルクだけを拡大)

参考文献

- 1) 足利: 電気自動車用モータの新技术, 電気学会誌, Vol.117, No.1, pp.18-21, 1997.1
- 2) 河村: 電気自動車の駆動系制御の動向と課題 -パワーエレクトロニクスとモータドライブの制御-, 計測と制御, Vol.36, No.11, pp.793-799, 1997.11
- 3) 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-D, 1, pp.45-50, 1998.1
- 4) 堀, 坂井: 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 No.9801, pp.26-32, 1998
- 5) 小椋他: 電気自動車技術の現状と将来, 自動車技術, Vol.53, No.1, 1999.1
- 6) 清水: 電気自動車の進歩とそれを支える要素技術, 自動車技術, Vol.53, No.2, 1999.2
- 7) S.Sakai, H. Sado and Y.Hori: Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors, IEEE Trans. on Mechatronics, Vol.4, No.1, pp.9-16, 1999.3
- 8) 堀, 坂井: コントロール~EVならではの新しい魅力~, ゼロエミッションフェア'99 講演会, 1999.6

[

time[s]
current control

time[s]
MFC