

# 各輪マイナー制御による電気自動車の2次元運動安定化 -”東大三月号II”での実験による基礎的検討-

正員 坂井 真一郎 (宇宙科学研究所)  
正員 堀 洋一 (東京大学)

## Vehicle Dynamics Stabilization with Minor Controller on Each Wheel of EV

Shin-ichiro Sakai, Member (The Institute of Space and Astronautical Science), Yoichi Hori, Member (The University of Tokyo)

Vehicle dynamics stabilization with wheel minor controller is proposed and discussed for electric vehicles (EVs). Quick motor torque response is the significant advantage of EVs, thus fast feedback control techniques can be fully applied in EVs. If appropriate controller is applied, it can change the dynamics of each wheel and the wheel comes to be stable for slip phenomena. This paper studies its influence on the vehicle lateral dynamics. We assume that (1) such minor wheel controller can stabilize the unstable lateral motion, (2) thus can be an effective minor loop in the vehicle stability control system or DYC (Direct Yaw Moment Control) system. Experimental results with “UOT March II”, which is newly constructed, are also discussed.

キーワード：電気自動車, 車両運動性能, ダイレクトヨーモーメントコントロール, アンチロックブレーキ, 増粘着制御  
Keywords: Electric Vehicle (EV), Vehicle Dynamics, DYC (Direct Yaw Moment Control), ABS (Anti-lock Braking System)

### 1. はじめに

電気自動車 (EV) をめぐる動きは、依然活況を呈している。“プリウス”に代表されるハイブリッド自動車 (HEV) は、既に相当の台数が市場に出ており、一方純モータ EV としては、燃料電池車 (FCEV) が次世代の切り札として期待を集めている。2001 年に入りダイムラー・クライスラーが “Necar 5” を発表するなど、FCEV をめぐる開発競争は、依然極めて興味深い状況にある。

主に環境性の観点からのこれら開発競争に対し、我々は運動制御面での EV のメリットを指摘し、これを十全に活用すべく研究を進めている<sup>(?)</sup>。その利点とは、高速なトルク応答、出力トルク値把握の正確性、そしてモータ小型化による分散配置の可能性である。これらの利点は、高速な線形フィードバック補償をベースとした運動制御の適用可能性を示唆している。ここでこの可能性を研究しておくことは、状態推定とフィードフォワード的な制御が中心となっている現在の車両制御に対し、将来の EV 普及を背景として新しいアプローチを示し、結果大きな寄与となるであろう。

本論分では各輪のマイナーなフィードバック補償と、車両の2次元運動安定性の関係に関して議論を行う。我々は従来、各輪のスリップ防止を目的として、フィードバックベースの車輪安定化制御を提案してきた<sup>(?)</sup>。このような各輪毎の制御が、滑りやすい路面を走る車両の旋回安定性にどう影響するのか、その基礎的な検討を試みるものである。

検討は、新たに完成した”東大三月号II”を用いた実験結果も用いて議論されている。この車両は、4輪全てが独立にモータ駆動されている EV である (図1, 2)。

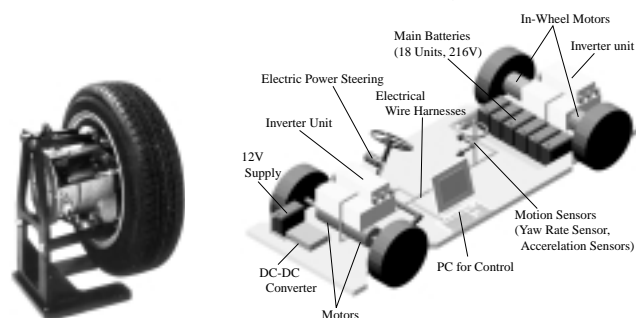


図1 完全4輪独立駆動EV”東大三月号II”概念図  
Fig.1. In-wheel motor(left) / “UOT March II” with four in-wheel motors(right).



図2 時速100[km/h]で走行中の”東大三月号II”  
Fig.2. “UOT Electric March II” at 100 [km/h].

## 2. 各輪マイナー制御による2次元運動安定化の提案

**2.1 自動車2次元運動の概要** 自動車の2次元運動は文献<sup>(2)</sup>などに詳しいが、ここでその概要のみ述べておく。

最も簡単なその運動方程式は、ヨーレート $\gamma$ 、車体すべり角 $\beta$ を状態変数として記述される。ここでヨーレート $\gamma$ とは、車体が重心回りに持つヨー角速度であり、車体すべり角 $\beta$ とは、車体の向いている方向と車体の速度ベクトルがなす角度である。旋回中にタイヤのスリップが発生して車体が斜め前方に滑っているような場合に、大きな角度となる。

左右輪の駆動力差を用いる車体運動制御としては、まずDYC(Direct Yaw Moment Control)が提案、検討されてきた<sup>(2)</sup>。これはヨーレート $\gamma$ に関するフィードバックを行うことで、舵角からヨーレートまでの伝達関数を整形し、その特性を改善するという制御である。その後VSC(Vehicle Stability Control)<sup>(2)</sup>などとして商品化される課程で、むしろ $\beta$ の安定化が主眼となり、 $\beta$ の増大に応じて適切なタイヤのみ制動し、車体のスピンを回避するといった目的に重きがおかれるようになった。 $\beta$ の検出が容易ではなく、これをいかに推定するかに関与上の難点があると言われている。

**2.2 各輪のマイナー制御に基づく2次元運動の安定化** 降雪時などの滑りやすい路面上では、駆動/制動に伴いタイヤでスリップ現象が発生し、車両が危険な状態に陥ることがある。ABSやTCSなどはこれを防止する制御であり、基本的には空転を検出してソレノイドパルスをon/offし、油圧ブレーキを減圧するという仕組みである。

これに対し筆者らは、電気モータの連続的なフィードバック制御による空転防止を提案、検討している。タイヤの空転現象は、最も簡単にはタイヤ慣性の急減として記述できるので<sup>(2)</sup>、これを防止するようなフィードバック制御を施せばよい(図3)。一般にタイヤのスリップは、車体速度 $V$ と車輪速度 $V_w$ の相対比であるスリップ率 $\lambda$

$$\lambda \stackrel{\text{def}}{=} \frac{V_w - V}{\max(|V_w|, |V|)} \quad (1)$$

なる変数で一般に記述されるが、ここではスリップ率ないし車体速度は容易には検出できないことなどから、車輪速度のみに基づくフィードバック制御を想定している。図3中、

$$P_n(s) = \frac{1}{(M + M_w)s} \quad (2)$$

である。但し、 $M$ は車両重量、 $M_w$ はタイヤ回転部慣性の質量換算値である。タイヤの粘着・空転現象は、最も簡単なモデルによれば以下のようなプラント $P$ の変動として記述できる。

$$P(s) = \begin{cases} P_{\text{skid}}(s) = \frac{1}{(M + M_w)s} & : \text{粘着時} \\ P_{\text{adh}}(s) = \frac{1}{M_w s} & : \text{空転時} \end{cases}$$

従って図3は、この慣性変動をノミナル化する、一種の外乱オブザーバとしても解釈できる。特にゲイン $K_p$ を

$$K_p = K_p^* = \frac{M + M_w}{M_w} \quad (3)$$

とすれば、空転時の特性は粘着時の特性と低域で一致する。図4は、モータトルク(力換算値) $F_m$ から車輪速度 $V_w$ までの伝達関数を示しており、プラントの変動が抑えられている様子を示すものである。

図5に、実験用EV“東大三月号I”を用いて、滑りやすい路面上で急発進する実験を行った結果を示す。図3中のフィードバックゲイン $K_p$ が0の場合、つまり制御が働いていない場合には、スリップ率が大きく成長しており、タイヤに深刻な空転が発生したことが理解される。一方図3のコントローラが動作すれば( $K_p > 0$ )、このような大きな空転は防止されることも、図から理解される。

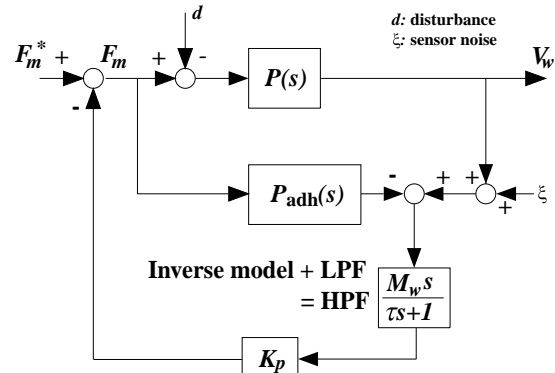


図3 車輪速度制御マイナーループ。

Fig. 3. Block Diagram of wheel velocity controller.

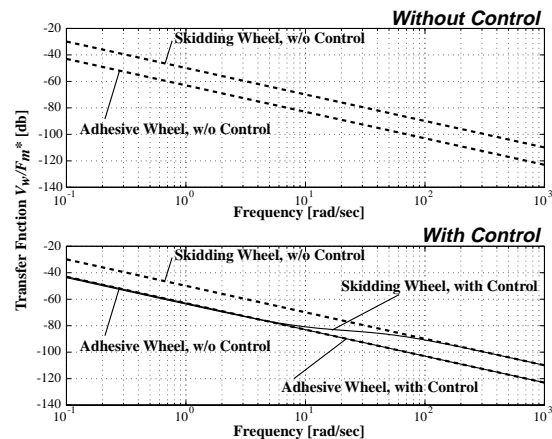


図4 空転時のプラント変動が防止されている様子。

Fig. 4. Bode diagram of  $V_w / F_m^*$ .

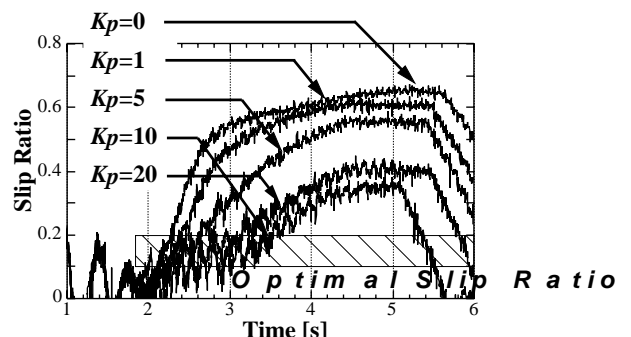


図5 空転実験の結果。

Fig. 5. Exp. results of wheel stabilization.  $\tau=0.1[s]$ , and  $K_p^*$  of Eq. (3) is 4.52 for this vehicle.

表 1 “東大三月号 II”諸元表.

Table 1. Specifications of “UOT Electric March II”.

Drivetrain	4 PM Motors / Meidensya Co.
Max. Power (20 sec.)	36 [kW] (48.3[HP])*
Max. Torque	77* [Nm]
Gear Ratio	5.0
Battery	Lead Acid
Weight	14.0 [kg] (for 1 unit)
Total Voltage	228 [V] (with 19 units)
Base Chassis	Nissan March K11
Wheel Base	2360 [m]
Wheel Tread F/R	1365/1325 [m]
Total Weight	1400 [kg]
Wheel Inertia**	8.2 [kg]***
Wheel Radius	0.28 [m]
Controller	
CPU	MMX Pentium 233[MHz]
Rotary Encoder	3600 [ppr]***
Gyro Sensor	Fiber Optical Type

\* ... for only one motor. \*\* ... mass equivalent.  
 \*\*\* ... affected by gear ratio.

では、このような制御は、車両の2次元運動とはどのような関係を持つのであろうか。図6に、これを検討する基礎的なシミュレーション結果を示す<sup>(?)</sup>。これは、滑りやすい路面を旋回中に、ドライバーが急制動を行った状況のシミュレーションである。車両モデルには、重心の移動による各輪の荷重変動まで考慮した、非線形モデルを採用している。

この時、特に制御を行わないと車両はいわゆるスピン状態に陥ってしまう(図6)。併せて図に示されているのは、各輪のモータに図3の制御系をそれぞれ構築した場合の結果である。この場合、危険なスピン挙動が安定化されていることが図から理解できる。この制御系はヨーレート $\gamma$ や $\beta$ の値は用いておらず、各輪の速度のみに基づいて動作している。また、各タイヤの制御系は相互に独立であり、お互いの状況は知らずに動作している。このことから、各輪のマイナー制御系が、車両全体の挙動を安定化する可能性を読み取ることができる。従って我々は、DYCのような車体全体の挙動制御系の下位に、このようなマイナー制御を構築し、全体の安定性と制御性を向上できるのではないかと考えている。

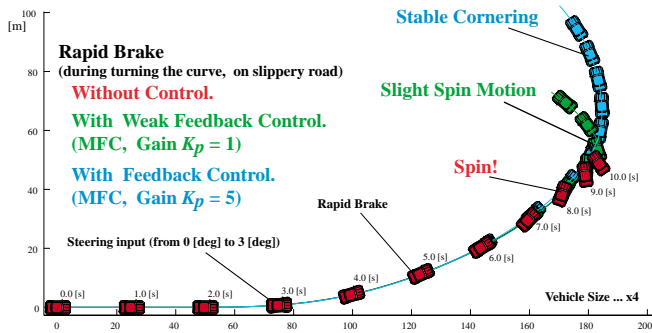


図 6 4輪のマイナー制御による2次元運動安定化。(シミュレーション結果)

Fig.6. Stabilizing effect with “controlled four wheels” is visualized with vehicle’s trajectory.

### 3. “東大3月号II”を用いた実験的検討

**3.1 “東大3月号II”の紹介** このような制御手法を実験的に検証するために、我々は新しい実験用EV，“東大3月号II”を製作してきた。その詳細は本大会における別稿に譲るが、最大の特徴は4輪全てにモータを搭載している点にある。また、光ファイバジャイロによりヨーレート $\gamma$ を検出することができ、各輪の速度もエンコーダによって計測されている。搭載制御系にはPC(OSはRT-Linux)を採用、1[ms]の制御周期で動作させている。表1に緒元を示す。図7は、完成した車両を用いた実験の様子である。

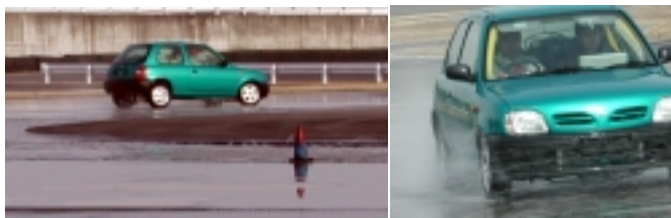


図 7 旋回実験中の“東大3月号II”

Fig.7. “UOT March II” in turning experiments.

**3.2 旋回安定性向上の基礎的実験結果** “東大3月号II”を用いて、旋回中に急加速する実験を行った。用いた路面は、スキッドパッドと呼ばれる滑りやすい低 $\mu$ 実験路である。実験の内容は前節で行ったシミュレーションと同様のものであるが、制動の代わりに加速を行ったこと、また車体速度モニタリングのため、4輪ではなく後輪2輪のみを駆動した点が異なっている。車両は初め、ほぼ一定速で定常旋回している。0[s]の時点で、後2輪に1000[N]の駆動力に相当するモータトルクがステップ上に入力される。図8が、特に制御は行わなかった場合の結果である。右後輪でタイヤ空転が発生している様子が理解される。この時ヨーレートは負であり、これは車両が時計回りの右旋回を行っていることを示している。従って荷重が少ない内側の右駆動輪で、空転が生じたものである。テストドライバーには、なるべくステアリング舵角を保つように指示している。これらの結果、車両にスピンが生じ、ヨーレートが負方向へ発散している。2[s]の時点でデータが途絶えているが、これは、これ以上の実験継続は危険と判断して実験を終了したためである。

このような状況に対し、駆動輪である後輪に、図3の制御系を適用する実験を行った。制御器の時定数 $\tau$ はシミュレーション同様100[ms]である。実験結果を図9に示す。車輪速度に振動が見られるものの、図8のような大きなタイヤ空転は防止され、ヨーレートの発散つまり車体のスピンも防止できている様子が理解される。図10はこれらの結果を比較した図であり、制御の効果を端的に示すものである。

### 4. おわりに

以上、EVの2次元運動安定化を安定化する制御手法の提案と、そのシミュレーション及び実験による検討を述べた。ここで検討されている我々のアイデアを、ブロック線図として図11に示しておく。関心は、モータを用いたマイナー制御系によって車両制御系の全体の安定性は向上するのかどうか、という点にある。本論文ではその基本的な可能性を実験的に示したが、今後は理論的な検討によりその効果を示す必要がある。また、実際に図11のように全体の姿勢制御系を組み合わせた実験も行い、その性質を検討することも必要

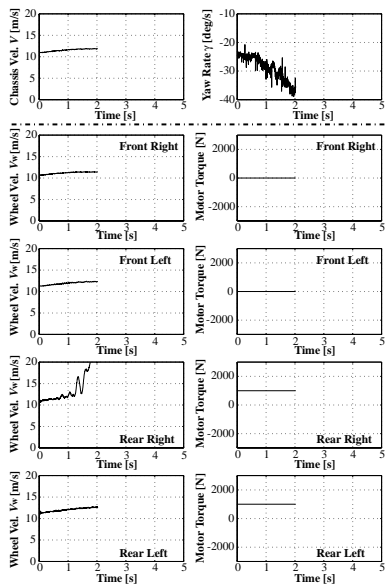


図 8 旋回中の急加速によるスピンの発生 (実験結果).  
Fig. 8. Unstable turning without feedback controller (Exp. Results.)  $|\gamma|$  unstably increases.

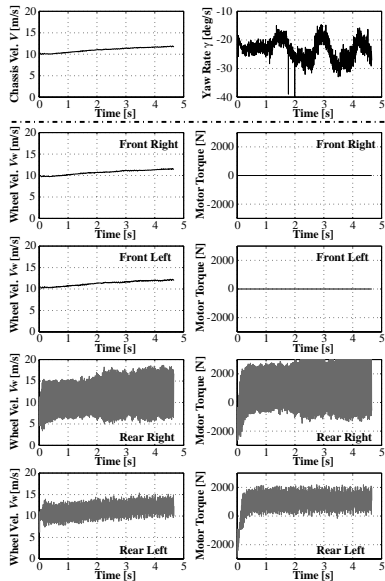


図 9 図 8 で各輪の制御が動作した場合 (実験結果).  
Fig. 9. Exp. results with wheel minor controller.

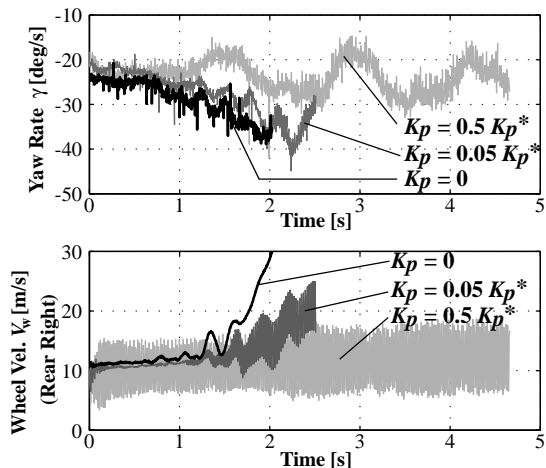


図 10 各輪マイナー制御による旋回制動の安定化.  
(実験結果の比較)  
Fig. 10. Comparison of experimental results. Vehicle dynamics is stabilized with wheel minor controller.

であろう。

$\beta$  推定などに依存した

最後に, ”東大3月号II”の特異性について言及しておく。このようなモータを複数搭載した車両は, 研究段階から商品段階まで, 既にいくつか発表されており, ”東大3月号II”で検討された制御が, そのまま実現できる可能性もある。また, モータのマイナー制御と車両全体の挙動安定性の関係について, なんらかの知見が得られることは, いずれにしても有益であると考えており, 今後の研究の進展に期待している。

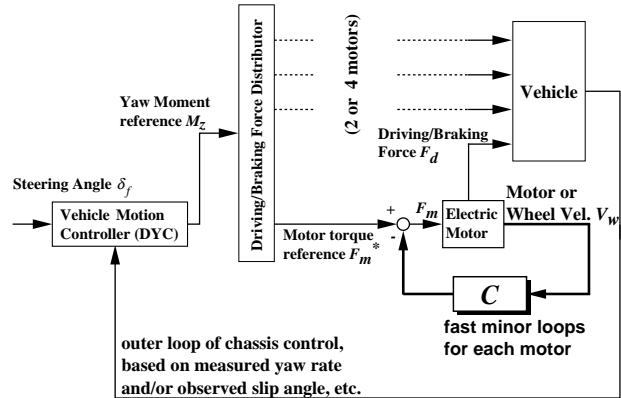


図 11 Our idea for total system: chassis controller with fast minor loops.

文 献