

電気自動車ならではの運動制御の可能性 ～「東大三月号 II」の走行実験報告～

戴建華*, 岡野隆宏, 井上友子, 坂井真一郎, 内田利之, 堀 洋一 (東京大学)

Tai Chien Hwa, Takahiro Okano, Tomoko Inoue, Shin-ichiro Sakai, Toshiyuki Uchida and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

It is possible to realize motion control methods which are possible only with Electric Vehicles (EV) if we make use of the excellent control characteristics of the electric motor. To demonstrate our theories, we have constructed an experimental EV, “UOT March II”, which is fitted with 4 in-wheel motors. With UOT March II, we are able to conduct experiments on advanced vehicle stability control methods such as Model Following Control (MFC) and Hybrid ABS (HABS). In this paper, we will introduce the experiments performed using UOT March II and present the results.

キーワード: 電気自動車, 運動制御, インホイールモータ, モデル追従制御, ハイブリッド ABS

(Keywords: electric vehicle, motion control, in-wheel motor, Model Following Control, Hybrid ABS)

1 はじめに

電気自動車 (EV) の駆動力源は電気モータであり、非常に良い制御特性を持っている。これらの特性を活用することによって、電気自動車ならではの運動制御が可能になる。本稿で著者は電気自動車を環境保護の面のみならず、運動制御の面からも見るべきと主張する。まず、電気自動車の研究の位置付けおよび著者が取っているスタンスを述べる。次に、著者が制作した 4 つのインホイールモータを搭載した電気自動車「東大三月号 II」を紹介する。最後に、「東大三月号 II」を用いた運動制御試験の実験結果を報告する。

1.1 電気自動車の研究の位置付け

世界中に環境意識が高まる中、電気自動車は自動車業界の一つの新しいパラダイムになりつつある。特に、昨年ベルリンで開催された EVS18 では、各自動車メーカは以下のような意識を共通に持っていたと感じられる。

- 当面の間内燃機関自動車 (ICEV) のエネルギー効率を上げる
- 移行期間にハイブリッド電気自動車 (HEV)
- 長期的な目標は燃料電池電気自動車 (FCEV)

そして、燃料電池の研究に各社が特に力を注いぐ動きが顕著になっている。

近年電気自動車の研究が再び盛んになったのは、米国のカリフォルニア州の排気規制である。しかし、純電気自動車 (PEV) は電池性能の制限による一充電走行距離の短さなど致命的な短所を持ち、早急な普及は期待できない。そこで HEV の出現により、自動車における性能の追求と環境保護の間の溝が埋められた。また、長期的には FCEV へ大きな期待が寄せられている。これらの進展はすべて EV のエネルギー効率が高いことおよび排気ガスがないことに基づいてきた。しかし、ICEV の駆動力源であるエンジンのエネルギー効率も絶えずに改善されてきた。現在、エネルギー効率の点において EV は確かに ICEV より優位に立っているが、ICEV の効率はこれからも上がっていくに違いない。EV がいつまでもその優位な立場を保てる保証はない。また、well to wheel の観点に立てば、EV の効率の計算に発電の源を考慮しなければならない。特に、最近の情勢では、原子力発電に対して反発が高まり、火力発電がしばらく主要な役を持ち

つづけることであろう。FCEV の場合でも、炭化水素物を改良する際に発する排気ガスや水素を生産するエネルギーコストなどは考慮すべき点がたくさんある。そのため、環境保護において電気自動車が内燃機関自動車より絶対に優れているとは一概には言いがたい。

ここでは、著者は電気自動車を運動制御の面からみつめることを提案する。電池や燃料電池の改良につながる研究はもちろん非常に重要であるが、電気モータの優れた制御性能を用いた運動制御の研究にも一瞥する価値がある。

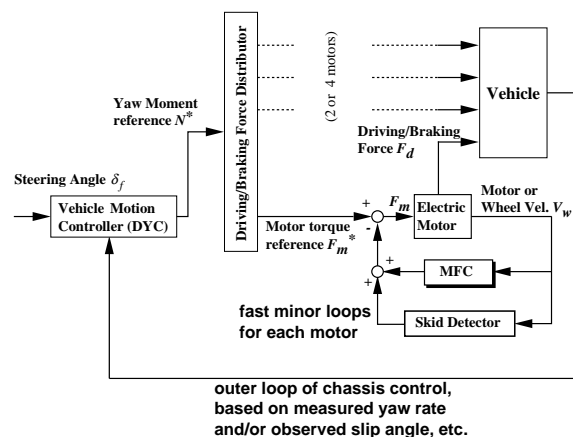


図 1: 上位制御器及びマイナーフィードバックループを用いた統合制御手法の概念図

1.2 運動制御アクチュエータとしての電気モータ

上述の HEV についてはトヨタ自動車のプリウスをはじめ、同じくトヨタ自動車のハイブリッドエスティマやクラウン、ホンダ技研工業のインサイトなどがすでに市場に出回っており、消費者から高い評価を得ている。HEV の燃費の輝かしい向上は、電気モータのアシストによってエンジンを最適領域で動作させることと回生ブレーキを利用することによって達成された。その延長線上に燃料電池ハイブリッド自動車 (FCHV) が提案された。ICEV と FCHV を比較してみれば、エンジンが燃料電池に取り替えられたことがわかる。しかし、ここでは駆動力源であるモータの重要な存在が忘れられがちである。厳密に考えてみ

れば、EV のパワートレインの中で ICEV のエンジンと対等な位置にあるのはモータである。燃料電池はむしろ原油の蒸留塔、電池はガソリンタンクと同じ位置付けとなる。運動制御に直接関係しているアクチュエータは電気モータである。

モータとエンジンを比較すると、モータは以下の優位性を持っている。

1. トルク応答が高速であること
2. 駆動・制動両方向のトルクが出力できること
3. 出力トルクが正確に観測できること
4. 分散配置ができること

例えば、エンジンのトルク応答が100~500[ms] であるのに対して、モータは桁違いの1[ms] 程度である。これほど早くなると制御系にフィードバックループを組むことができるようになる。また、モータはトランスミッションを介さずに駆動力も制動力も出力することができるため、より高性能な ABS 制御系の実現が可能となる。出力トルクが正確に観測できることは、制御対象を簡単にモデル化できることを意味している。このことは高度な路面状態推定を可能にする(本論文では省略するが、詳細は文献 [8][9] をご覧いただきたい)。そして、分散配置が可能となれば各車輪を完全に独立制御するという夢のような制御法が実現できる。図 1 は著者らが提案する車両の統合運動制御手法の概念図を示している。各モータに早いマイナーループを組んで瞬間に起きる空転を防止し、その上に上位コントローラを設けて車両を統合的に制御する手法である。

2 実験車両「東大三月号 II」

電気自動車ならではの制御手法を実現するために、著者らは実験車両「東大三月号 II」を製作し、試験運転などを行った。ここでは、「東大三月号 II」について紹介しておく。

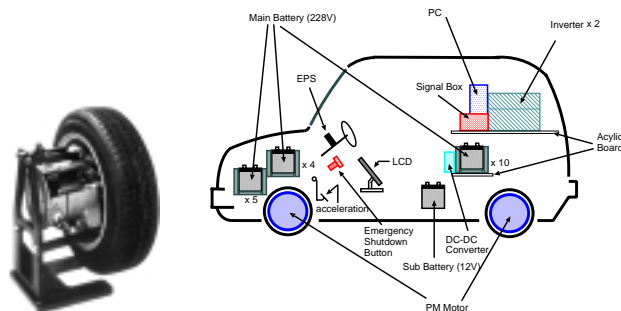


図 2: インホイールモータ / 「東大三月号 II」の構成概要

2.1 「東大三月号 II」の主要諸元

「東大三月号 II」は市販の日産マーチから改造された電気自動車である。この実験車両の一番大きな特徴は各車輪にモータが搭載され、完全に独立制御ができることである(図 2)。表 1 はこの実験車両の諸元を示している。搭載されたモータは PM モータであり、ドラムブレーキや減速ギアがモータに内蔵されているので、モータ全体がコンパクトになる。このモータがホイールと同等な大きさになるため、インホイールモータと呼ばれる。前輪及び後輪は 2 基が一組となって、鉄板によって連結されて車のシャーシに取り付けられる(図 3, 4)。各モータは「東大三月号 II」に搭載されている 2 台のパソコンによって制御される。パソコンは加速度センサ、光ファイバジャイロ、舵角センサなど計装系からの信号を受け取り、ソフトウェア上に組まれたコントローラで処理を行い、インバータにトルク(図 5) 指令値を出



図 3: 前輪モータ



図 4: 後輪モータ



図 5: インバータ



図 6: 電池

す。モータには、インバータの電流制御器によって、正確なトルクが発生される。「東大三月号 II」の電源システムは主電源の鉛電池 19 個と補助電池 1 個より形成される(図 6)。

3 モデル追従制御の原理

電気モータの早いトルク応答を利用したスリップ率制御やモデル追従制御(MFC) などの空転防止制御手法を著者らが [1][2] で提案した。これらの制御手法はフィードバック手法であるため、とてもロバストな制御が実現される。ここで、MFC を説明する。

3.1 線形スリップモデル

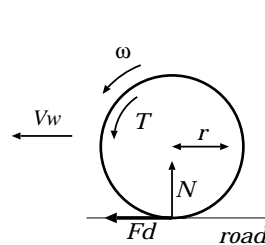


図 7: 一輪自動車モデル

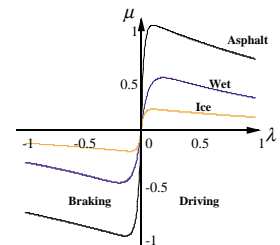


図 8: 典型的な $\mu - \lambda$ 曲線

空転を定量化した値であるスリップ率は一般的に(1)式で表される。

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

ただし、 V は車体速度、 V_w は車輪速度である。

自動車のもっとも簡単なモデルは図 7 で示された一輪モデルである。このモデルは(2)、(3)式で表すことができる。

$$M_w \frac{dV_w}{dt} = F_m - F_d(\lambda) \quad (2)$$

$$M \frac{dV}{dt} = F_d(\lambda) \quad (3)$$

表 1: 実験車両「東大三月号 II」の諸元

駆動系	
モータ	8 極ブラシレス DC モータ (明電社)
重量	25.3 [kg]*1
定格出力	4 [kW] (1 hr) / 36 [kW] (20 sec)
最高回転速度	8700 [rpm] / 170 [km/h]
最大トルク	77*2 [Nm] at 4400 [rpm]
減速比	1/5 (固定)
コントロールユニット	
回路方式	PWM インバータ
冷却方式	強制空冷
質量	約 31 [kg]
電源系統	
主電池	Panasonic EC-EV1238
容量	12 [V], 38 [Ah] (1 個)
重量	14.0 [kg] (1 個)
総電圧	228 [V] (19 個)
車両	
車体	Nissan March K11
車軸間距離	2360 [m]
車輪間距離 (前/後)	1365/1325 [m]
総重量	1400 [kg]
車輪慣性	8.2 [kg]
車輪半径	0.28 [m]
計装系	
制御用 CPU	Pentium MMX 233 [MHz] (Intel)
エンコーダパルス数	3600 [ppr] *3
加速度センサ	ADXL202 (Analog Devices)
ヨーレートセンサ	光ファイバジャイロ (日立電線)

*1 モータ、ドラムブレーキ、減速ギアなどを含む

*2 モータ 1 基

*3 A、B 各相のパルス数

ただし、(2)、(3) 式では空気抵抗や転がり抵抗などが無視されている。 M は車両の質量、 M_w は車輪の換算質量、 F_m は加減速トルク力換算値、 F_d は路面と車輪の間に発生する駆動・制動力である。 F_d と路面からの反力 N および摩擦係数 μ の関係は (4) 式で示される。

$$F_d = \mu N \quad (4)$$

図 8 に示されるように、 $\mu - \lambda$ 曲線は非線形である。空転防止制御器を設計する前にその曲線を線形化する。ここで、動作点 $\lambda = \lambda_0$ の近辺の摂動系を考える。まず、 a を図 5 のように定義する。

$$a \equiv \left. \frac{d\mu}{d\lambda} \right|_{\lambda_0} \quad (5)$$

(1)–(5) 式より、次の式が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta F_d &= N \Delta \mu = a N \Delta \lambda \\ &= -\frac{1}{V_{w0}} \Delta V + \frac{V_0}{V_{w0}^2} \Delta V_w \end{aligned} \quad (6)$$

そして、 F_m から V_w の伝達関数は以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned} P(s) &= \frac{\Delta V}{\Delta F_m} \\ &= \frac{1}{(M_w + M(1 - \lambda_0))s} \frac{\tau_w s + 1}{\tau_a s + 1} \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 τ_a と τ_w は次のように定義される。

$$\tau_a \equiv \frac{M_w V_{w0}}{aN} \frac{M}{M(1 - \lambda_0) + M_w} \quad (8)$$

$$\tau_w \equiv \frac{M V_{w0}}{aN} \quad (9)$$

車輪が空転しているときに $\lambda_0 = 1$ とし、また車輪が路面に粘着しているとき $\lambda_0 = 0$ とすると、

$$P_{adh} = \frac{1}{(M + M_w)s} \quad (10)$$

$$P_{skid} = \frac{1}{M_w s} \quad (11)$$

粘着領域 ((10) 式) と空転領域 ((11) 式) の伝達関数が得られる。次の節で、MFC 制御器の設計を説明する。

3.2 MFC 制御器の設計

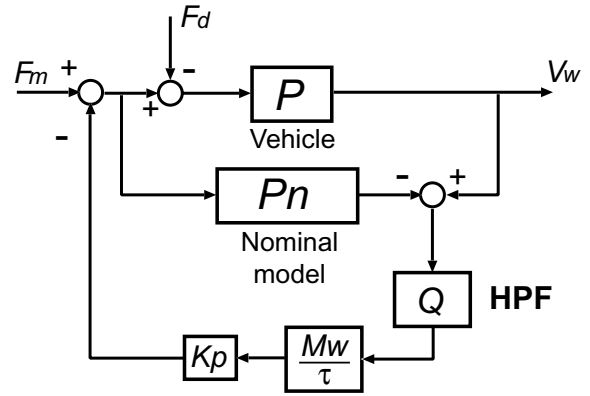


図 9: 提案する MFC 制御器のブロック線図

図 9 モデル追従制御のブロック線図である。MFC の考え方は、制御されるプラントとある理想的なノミナルプラントの出力に差が生じた場合、その差をフィードバックすることによって実際のプラントを理想プラントに近付ける。車輪が空転する場合は、車輪速度が急に变化する。(10)、(11) 式により、車輪が空転したとき、車輪の有効換算質量が急に落ちると見なしてよい。これに基づいて、(10) 式を図 9 のノミナルモデルとしてコントローラを設計する。このコントローラを適用することによって、空転している車輪のダイナミクスが粘着している車輪のダイナミクスに近寄る。つまり、MFC 制御が掛けられた車輪はスリップに対して鈍感になっている。

4 実験による MFC の検証

前の章で説明された MFC 制御器を用いて実験を行った。実験は低 μ 路上で行われ、直進時の制動実験と旋回時の姿勢制御実験の 2 種類である。この章で実験結果をまとめて報告する。

4.1 MFC によるブレーキ性能の改善

図 10, 11 は制動実験の結果を示している。この実験では、実験車両が低 μ 路上で直進走行をしているとき、急にブレーキが

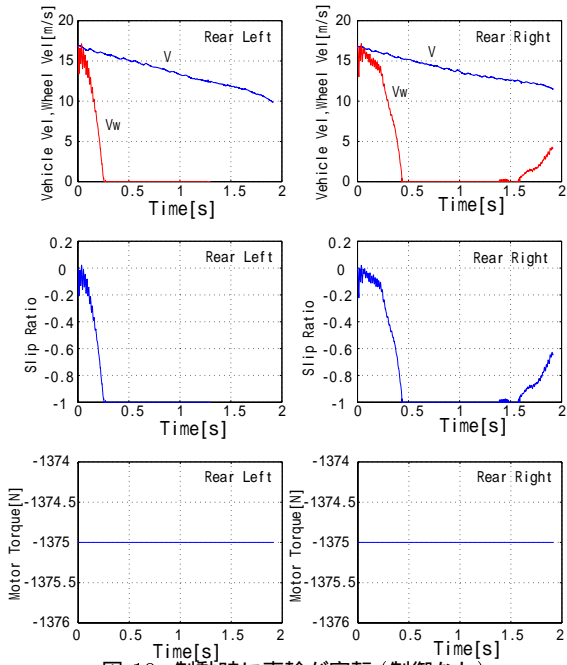


図 10: 制動時に車輪が空転 (制御なし)

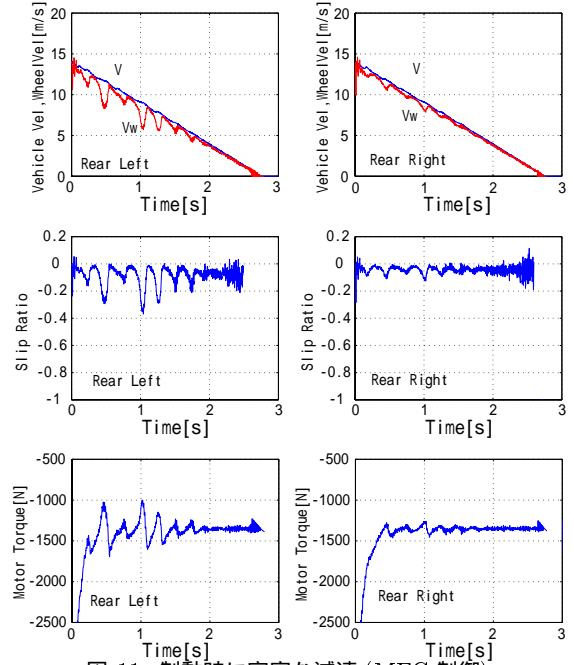


図 11: 制動時に安定な減速 (MFC 制御)

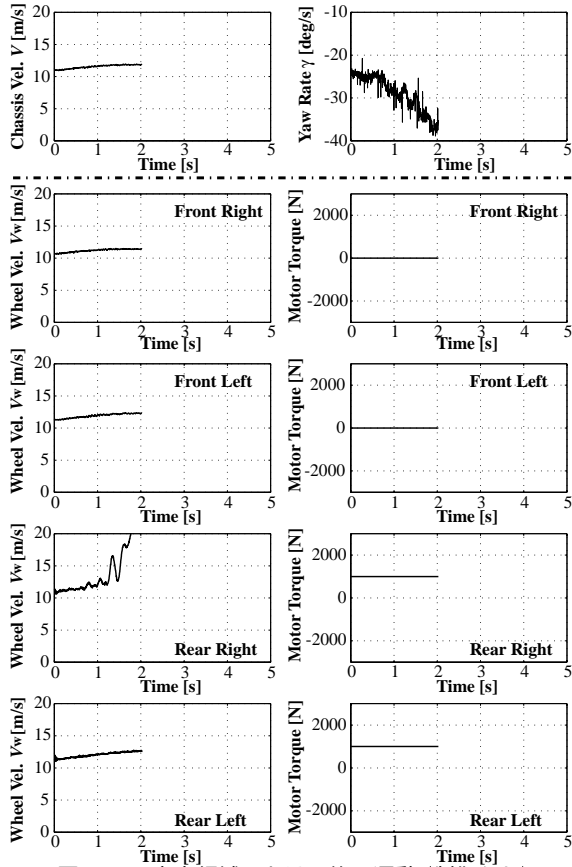


図 12: 不安定領域における旋回運動 (制御なし)

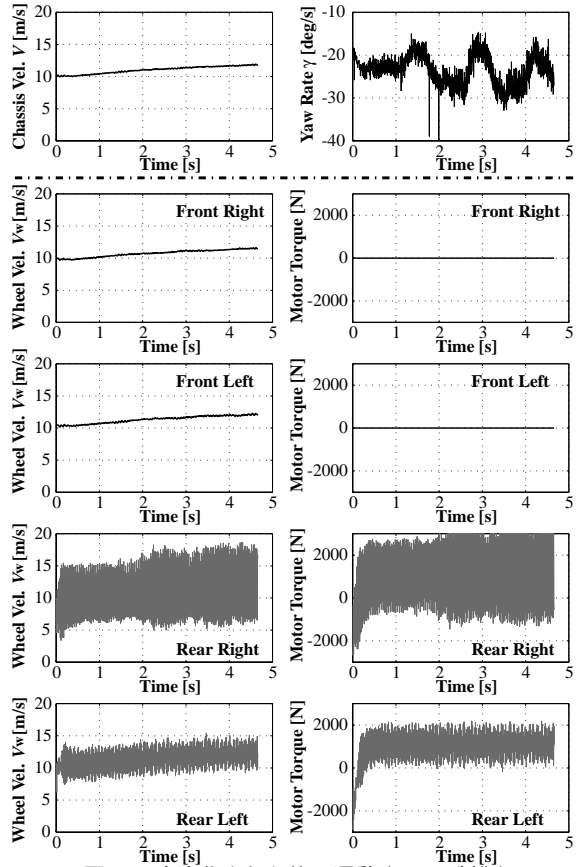


図 13: 安定化された旋回運動 (MFC 制御)



図 14: 「東大三月号 II」の実験風景

踏まれる。制御なしの場合では、車輪速度が急に減少し、車輪が 0.5[s] 秒以内でロックした状態になってしまった (図 10)。これに対して、MFC 制御がかけられた場合では車輪速度が緩やかに減少し、スリップ率がほぼ一定に保たれている (図 11)。このとき、車輪がロック状態にならず、車が安全に停止できた。MFC 制御によって、車輪が空転しそうなときに車輪の換算質量は「重く」なり、急なスリップ率の変動が抑えられ、空転が防止された。

4.2 MFC による車両姿勢の安定化

MFC がスリップ率や車輪速度の急変を抑えることは上に述べられた。ここは、車が滑りやすい路面上で旋回運動をするときに各車輪に MFC 制御をかけた場合を議論する。滑りやすい路面上で急にブレーキをかけたりハンドルを切ったりすると車の姿勢が不安定になることはよく知られている。この実験では、「東大三月号 II」が低い路面 μ のスキッドパッド上で旋回運動をした。そのとき、後輪の速度は 2 つのモータによって独立に制御されていた (「東大三月号 II」は各車輪に 4 つのモータが搭載されている)。

実験の初期状態では、「東大三月号 II」は時速 40[km/h] で時計周りに旋回運動 (旋回半径は 25 ~ 30[m]) をしていた。そこで、2 つの後輪に 1000[N] のトルク指令 (加速方向) が与えられる。制御なしの場合では、右後輪がすぐ空転してしまい、ヨーレートも急に不安定になった (図 12)。そのとき、車はすでにスピンの入り、完全に制御不能になってしまった。

MFC 制御がかけられた場合は、このような危険な動きが防がれる。図 13, 15 より、MFC 制御によってヨーレートの急変は抑えられることが明らかである。この実験では、各後輪を同じ MFC 制御でありながら、完全に独立に制御したが、車両の姿勢安定性が保たれた。各駆動輪が独立に安定化されることによって、DYC(Direct Yaw moment Control) のような効果が得られた。

しかし、図 13, 15 から分かるように制御がかけられているときに、車輪速度が非常に振動的になってしまう。これは制御器のパラメータを変えることによって改善されると考えられる。この課題を次回の実験で検討する。

5 ハイブリッド ABS

前述のように、HEV はすでに相当な台数が市場に出回っている。HEV に搭載されている電気モータは低速領域で駆動力の補助および制動時のエネルギー再生装置として燃費の向上に貢献している。しかし電気モータの特長である”トルク応答が高速かつ正確である”という観点に立てば、現行のハイブリッド自動車は電気モータの潜在能力を最大限に発揮しているとは言い難い。ここで、PEV に搭載されている電気モータと同様に活かし、ABS や TCS などの空転防止効果が得られると考えられる。

従来型の ABS は空転発生時に油圧系統の切替えを自動的に行

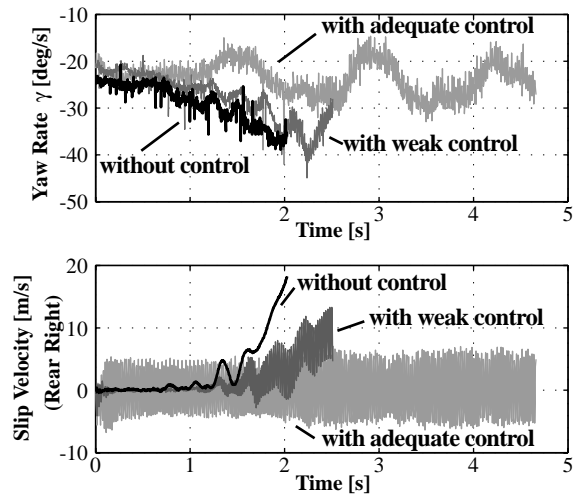


図 15: 旋回時の車両のヨーレート及びスリップ速度

うことで、ブレーキトルクの調整をおこなっている。油圧系統の切替えには、ソレノイドバルブが用いられる。油圧系統には「増圧」、「圧力保持」、「減圧」3 種類の系統構成がある。ABS コントローラはタイヤの空転を検知すると、ソレノイドバルブへの通電を on/off することで油圧系統を切り替え、bang-bang 制御を行うことで空転状態からの脱出を実現している。しかし、従来型 ABS は滑りはじめの空転防止制御が十分達成できていないという問題点がある。油圧アクチュエータは応答特性が十分に速いとは言えず、また減圧方向の制御が不可能であるため、空転検出後より実際に作動するまでの間に車体は滑走を続けてしまう。この傾向は特に低 μ 路において顕著である。しかし、従来型の ABS に用いられている油圧アクチュエータと協調させることで、HEV に搭載されている電気モータの容量不足という問題は解決できると同時に従来型 ABS の短所を補うことができる。このような視点からの研究の例はあまり多くないが、著者らは従来の油圧アクチュエータを用いた ABS の制御則を変更することなく、電気再生ブレーキの制御則を付加することで制動性能の向上を図った。これをハイブリッド ABS(HABS) と呼ぶ。

5.1 フィルタによる周波数分離を用いた協調制御系の設計

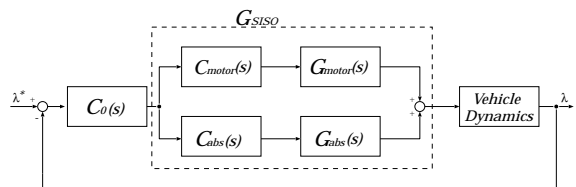


図 16: 従来型 ABS と電気モータの協調制御の概念図

図 16 に協調制御系の概念図を示す。ここで G_{motor}, G_{abs} は、それぞれ電気モータと油圧ブレーキの動特性であり制御系設計の際には一次遅れ近似する。また、 C_{motor}, C_{abs} はそれぞれのアクチュエータのコントローラである。まず図 16 における G_{SISO} を決定することから協調制御系の設計は始まる。 G_{SISO} は、(12) 式

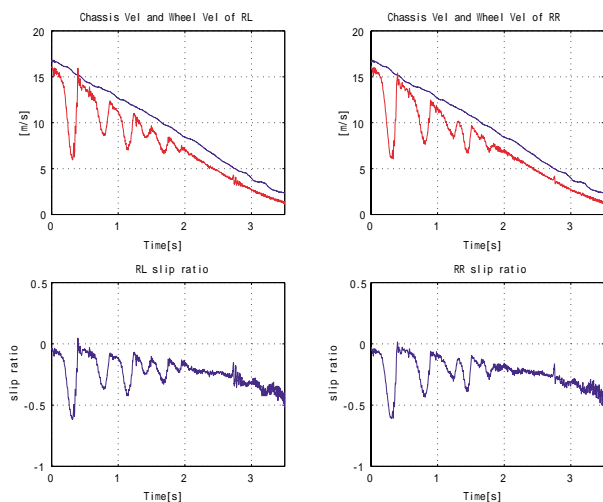


図 17: HABS の初歩的な実験結果

で表される。

$$G_{SISO} = C_{motor}G_{motor} + C_{abs}G_{abs} \quad (12)$$

本提案手法では、まず 2 種類のアクチュエータの伝達特性を、

$$G_{motor}(s) \cong 1, \quad G_{abs}(s) \cong \frac{1}{1 + \tau_{abs}s} \quad (13)$$

と仮定する。その上で図 16 における G_{SISO} を

$$G_{SISO} = C_{motor}G_{motor} + C_{abs}G_{motor} = 1 \quad (14)$$

となるように設計する。これにより、 C_{motor}, C_{abs} でそれぞれのアクチュエータの作動周波数帯を分離し C_0 で、スリップ率制御を行うという役割分担を明確にする。設計した C_{abs} は、(15) 式のとおりである。

$$C_{motor}(s) = \frac{s}{s + \omega}, \quad C_{abs}(s) = \frac{\omega}{s + \omega}(1 + \tau_{abs}s) \quad (15)$$

しかし (15) 式をそのまま採用すると、電気モータは低周波数帯において全くトルクの負担をしない。電気モータの出力トルクに上限があるという側面はあるが、エネルギー回生の観点から好ましいことではない。そこで低周波数帯においても電気モータにトルクを負担させるべく C_{motor} を、

$$C_{motor}(s) = \frac{s + 0.1}{s + \omega} \quad (16)$$

とする。このように C_{motor} で低周波数帯でのゲインを調節することで制動によるエネルギー回生効率を容易に設定することができる。

5.2 HABS の初歩的な実験による検証

現在「東大三月号 II」を用いて HABS の実験をしようとする一つの難問がある。それは、改造の過程で従来車に搭載された ABS システムは設計上の都合で外されたからである。今後、ABS システムを再装着する予定であるが、とりえず車制御用のパソコン上で模擬することによって初歩的な検討を行った。Bang-bang 制御方式の ABS を想定して、計算機上でモータの制御指令と足し合わせてから、最終的なモータトルクの指令値を出す。低 μ 路上の制動実験の結果は図 17 に示された。この実験は完全なものではないが、図 17 より、スリップ率追従ができていくことが分かる。初歩的な検討にすぎないが、この手法の可能性を示唆している。

6 結論

電気自動車は一つの大きな魅力はその駆動力源である電気モータの優れた制御性である。この優れた制御性を積極的に利用すれば、電気自動車ならではの高度な運動制御が可能となる。著者らは、4 つのインホイールモータを搭載した実験電気自動車を製作し、様々な運動制御の実験を行った。実験結果より、各車輪に独立に適用されたモデル追従制御が空転防止や姿勢制御に有効であることが実証された。また、従来の油圧 ABS と電気モータによる回生ブレーキの協調制御の可能性が実験によって示された。

今後電気自動車が市場に普及するまで、まだまだ様々な方面の技術上の課題が残っている。今までほとんど注目されなかった制御方面の課題および可能性はこれからつめていけば、電気自動車の今まで知られなかった素晴らしさが明らかになるであろう。

参考文献

- [1] 鶴岡慶雅, 豊田靖, 堀洋一, “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”, 電学論 D, Vol. 118, No. 1, pp. 45-50, Jan 1998.
- [2] 坂井真一郎, 佐渡秀夫, 堀洋一, “電気自動車における車体速度情報不要の新しいタイヤ空転検出法”, 電学論 D, Vol. 120, No. 2, pp. 281-287, Feb 2000.
- [3] Shin-ichiro Sakai, Hideo Sado, Yoichi Hori, “Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors”, IEEE-ASME Trans. Mech., Vol. 4, No. 1, pp. 9-16, Mar 1999.
- [4] Yasuji Shibahata et al, “The improvement of vehicle maneuverability by direct yaw moment control”, Proc. 1st International Symposium on Advanced Vehicle Control, No. 923081, 1992.
- [5] Sumio Motoyama et al., “Effect of traction force distribution control on vehicle dynamics”, Proc. 1st International Symposium on Advanced Vehicle Control, No. 923080, 1992.
- [6] Y. Furukawa, M. Abe, “Direct yaw moment control with estimating side-slip angle by using on-board-tire-model”, Proc. 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control, pp. 431-436, Nagoya, 1998.
- [7] 岡野隆宏, 坂井真一郎, 藤本博志, 堀洋一, “ハイブリッド自動車における油圧ブレーキと電気モータの協調制御による新しい ABS の提案と基礎実験”, 平成 13 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol. 3, pp. 1441-1444, 2001.
- [8] 佐渡秀夫, 坂井真一郎, 内田利之, 堀洋一, “路面状態推定とスリップ率制御を用いた電気自動車の高性能トラクションコントロール”, 平成 10 年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, Vol. 1, pp. 321-324, 1998.
- [9] Hideo Sado, Shin-ichiro Sakai, Yoichi Hori, “Road condition estimation for traction control in electric vehicle”, Proc. The 1999 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bled, Slovenia, pp. 973-978, 1999.