

電気自動車における粘着制御の研究動向

Recent Trend of Electric Vehicle's Adhesion Control

工学系研究科 電気工学専攻 堀研究室

修士課程 1 年 36348 小玉 晋也

Abstract

In recent years, the Electric Vehicle (EV) has attracted considerable interests as one of hopeful solutions for solving environmental and energy problems. In this paper, firstly, vehicle's adhesion phenomenon is introduced. Secondly, the motion control of vehicle is categorized; its history and basic technologies are also discussed, for example, ABS, TCS and VSC. Then the EV's advantages and a new technology for hybrid electric vehicle (HEV) are presented. Finally, how to realize the anti-slip re-adhesion control based on disturbance observer and speed sensor-less vector control between rail and driving wheel are mentioned.

1 はじめに

環境技術を制する者が 21 世紀の自動車技術を制する。このように表現しても過言ではない時代がやってきた。

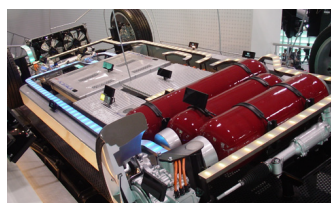
電気自動車 (EV) と一言で表しても、蓄電池を電源とする純電池式の電気自動車 (EV)、内燃機関とモータを併用するハイブリッド電気自動車 (HEV)、燃料電池を電源とする燃料電池車 (FCEV) などがある。しかしながら、電気モータが駆動源となっていれば電気モータが持つ制御面での利点を十分に活かした技術を議論することが可能である。

先日、幕張メッセで行われた第 37 回東京モーターショー 2003 (乗用車・二輪車) においても、ブリヂストンが Bridgestone Dynamic-Damper type In-Wheel Motor System という新概念のインホイールモータを発表 (Fig.1(a))、トヨタが 4 輪にインホイールモータを搭載した燃料電池ハイブリッド車 Fine-N を発表 (Fig.1(b))、慶応大学が KAZ[1] の最高時速 311km/h を超える時速 400km/h を目指すための Ellica のコンセプトモデルを発表したほか、国内外の自動車会社各社が燃料電池車のコンセプトカーなどを発表している。このように、電気自動車における技術やそれに直結する技術の開発競争は加速している。

市販車レベルでは、フォード・モーターが 2004 年夏からハイブリッド電気自動車の商業生産を開始すると発表している。ハイブリッド電気自動車の市販車生産は、トヨタ、ホンダに続き 3 社目で、日本以外のメーカーでは初めてとなる。



(a) Bridgestone Dynamic-Damper type In-wheel Motor System



(b) Fine-N (TOYOTA)

Fig.1: Tokyo Motor Show 2003

2 粘着現象とは

加速中の車両では、タイヤと路面間に微小なスリップが生じて駆動力が得られる。スリップの大きさはスリップ率 λ で表し、駆動輪速度を V_w 、車体速度を V とすれば次式で与えられる。

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

タイヤと路面間の摩擦係数 (駆動力係数、横力係数) μ は、スリップ率 λ に依存し、Fig.2 に示すように一般に前進方向では $0.05 \leq \lambda \leq 0.2$ の範囲で最大値をとったのち減少し、横方向ではスリップ率 $\lambda = 0$ で最大値を取り λ の増加とともに急激に減少する特性を示す。

鉄道車両と自動車とでは、車輪と路面との接触面が大きく異なる (Fig.3)。鉄道の場合、鉄車輪・鉄レールの間には、狭くて硬くて重い面圧の接触があり、先頭台車の通過のみで、氷や雪の厚い潤滑膜を破壊することが可能である。これによって、車輪とレールとの部分的な接触を得ることができる。自動車との大きな違いはここにある。

3 自動車における運動制御

3.1 運動制御の分類

車両運動制御は大別すると、タイヤの線形領域である通常走行領域を用いた制御と、タイヤの非線形領域である非常走行領域を用いた制御の 2 種類に分類することができる。現在すでに実用化されている車両運動制御システムを Fig.4 に簡単にまとめる。

タイヤの線形領域を用いた車両運動制御には、主に ITS に用いられている車間距離をレーダ及びセンサで計測しながら走行する ACC (Adaptive Cruise Control) [2] などがある。また、車両の操舵

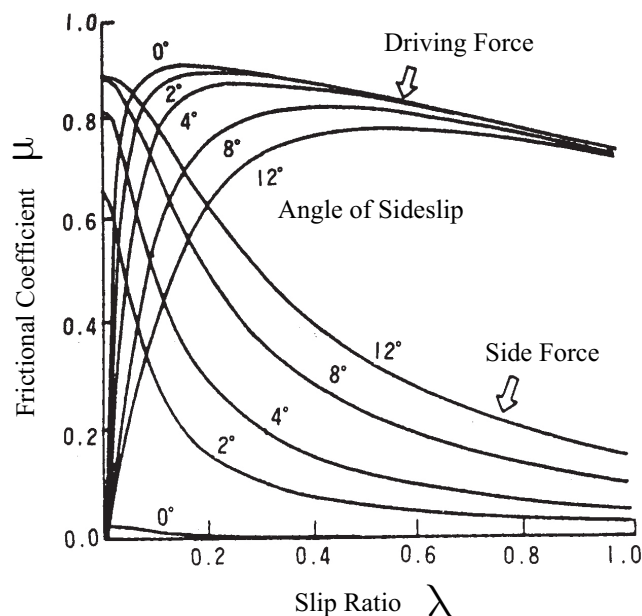


Fig.2: μ - λ curve in longitudinal and lateral direction

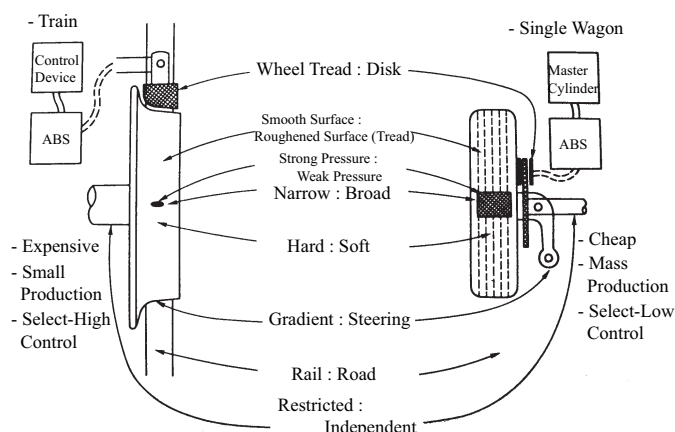


Fig.3: Difference of adhesive braking between Railway and Vehicle

age	development of ABS	development of TCS
1970	78. 4 Wheels ABS Mercedes/Bosch 450SEL	82. Volvo ETC
1980	82. 4 Wheels ABS Honda Prelude	78-91. BMW ASC Mercedes ASR Nissan E-TS
1990	83. 4 Wheels ABS Toyota Crown	Toyota TRC Honda TCS Mitsubishi TCL
2000	86. Yaw Control ABS Mercedes	Porsche Tiptro
	92. EBD Teves	
		95- Mercedes ESP Toyota VSC

Fig.5: History of ABS and TCS

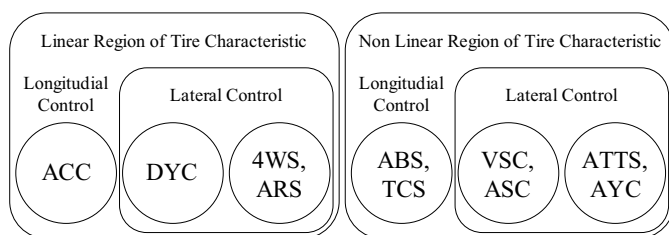


Fig.4: Classification of Vehicle Motion Control

応答性を向上することによって、タイヤの非線形領域に達しないようにする後輪操舵を用いた制御には、後輪タイヤ横力をコントロールする 4WS (Four Wheel Steering), ARS (Active Rear Steer), DYC (Direct Yaw moment Control) などがある。

タイヤの非線形領域を用いた車両運動制御には、前後方向の制御に ABS (Anti-lock Braking System) や TCS (Traction Control System) があり、横方向の制御には、タイヤの左右輪の制動力差を用いた VSC (Vehicle Stability Control), ASC (Active Steering Control), タイヤ左右輪の駆動力差を用いた ATTS (Active Torque Transfer System), AYC (Active Yaw Control System) などがある。これらはタイヤの前後力をコントロールすることで、車両の発生するヨーモーメントをコントロールするシステムであり、左右輪の前後力差を用いた直接ヨーモーメント制御がタイヤの非線形領域における操作安定性向上に有利であることが知られている。

本稿では、ABS, TCS, VSC についてももう少し詳しくみていく。

3.2 予防安全の歴史的背景

車両運動制御の歴史を振り返ってみると、アカデミックなハードウェアとして ABS が登場したのは 1970 年のことである。当時の ABS はアナログ制御で、タイヤのロックを検出するとブレーキの油圧をオン・オフの切り替えで制御するというシンプルな構造であった。しかしながら、危険回避のための急ブレーキ時にタイヤのロックを防いで、車両の方向安定性を確保するシステムは、雨の日のアウトバーンで大きな効果を得ていた。

車輪速度センサを用いた ABS はボッシュが開発し、1978 年にベンツに搭載したのをきっかけに、80 年代に入ってから電子技術の向上に合わせて急速に世界中の車両に採用されることになった。そして、ABS は予防安全の分野において重要な役割を果たしてきたのである。

ダイムラー・ベンツ社 (現在はダイムラー・クライスラー社) は、ABS を普及させた後も、駆動輪の空転を防いで加速時の方向安定性を確保するトラクションコントロールシステム (ASR) や、車両

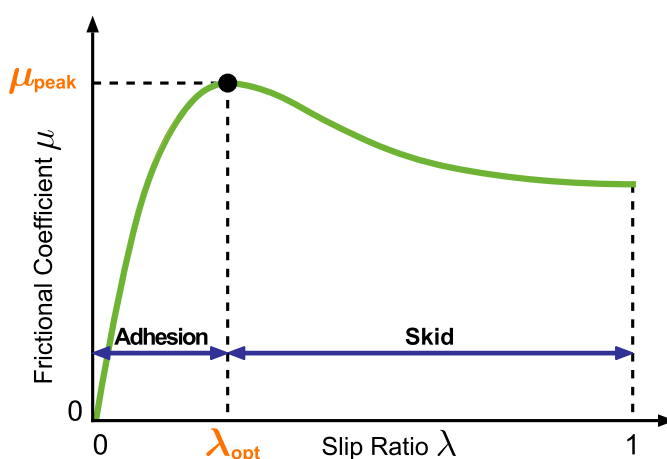


Fig.6: Adhesion area and skid area in μ - λ curve

のコントロールを失いやすい路面での統合的な駆動制御システムなどの電子技術を次々に採用。最近では、ABC (アクティブ・ボディ・コントロール) というフルアクティブ・サスペンションを導入し、乗用車を進化させてきた。

Fig.5 に示すように、これまで予防安全に関する基礎的な車両制御技術が各自動車メーカーの間で競って開発されたきた。

3.3 ABS

ABS (Anti-lock Braking System) は、制動中に車輪がロックするのを防ぐことにより、車両の操舵性と方向安定性を維持しようとするブレーキシステム内の閉ループ制御装置である。液圧モジュレーター、車輪速センサ、及び ECU (コントロールユニット) などから構成される [3, 4]。

ブレーキをかけるとブレーキ圧が上昇する。そして、ブレーキのスリップ率が増加し、グリップ/スリップ曲線のピーク点で、安定領域と不安定領域の境界に達する。この点からブレーキ液圧または制動トルクがさらに上昇しても、制動力は増加しない。ブレーキスリップは、安定領域内だと主に変形スリップだが、不安定領域内に入ると徐々にスキッドの傾向が強まる。この様子を Fig.6 に示す。

このような領域に入ると、スリップ曲線の形によって程度の多少はあるが、摩擦係数は急速に低下する。その結果、制動トルクの増加によって、極めて短時間内に車輪がロック (固着) する (ABS なしブレーキ装置の場合)。これは、車輪減速度の急上昇で表される。

車輪速センサは車輪の動きを常に監視している。ある車輪がロックの兆候を示すと、車輪の減速度とスリップが急速に上昇す

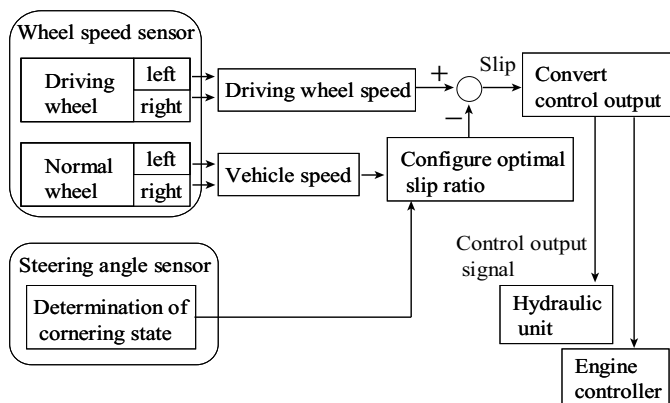


Fig.7: Control logic of TCS

る。車輪周速の減速度やスリップ率が基準値を超えると、コントローラーはソレノイドバルブユニットに命令を送り、ロックの心配がなくなるまで車輪側のブレーキ液圧を保持するか、あるいは低下させる。その後、制動力が小さくなりすぎないようにするために、ブレーキ液圧を再び上昇させる。ブレーキの自動制御中に、車輪が安定領域と不安定領域のどちらにあるかを常時検出する必要がある。一連の圧力の増加や減少、そして液圧保持を制御している間、車輪は最大制動力を得られるスリップ率の範囲に収まっていなければならない。

3.4 TCS

3.4.1 概要

TCS (Traction Control System) は、駆動力とコーナリングフォースを現在走行中の路面と車両の運動状態に最適に制御するものである。駆動力制御量を決めるための方法の一例を Fig.7 に示した。車輪速度センサからの信号より駆動輪速度 V_w 、車体速度 V を算出し、駆動輪速度 V_w が車体速度 V のおよそ 10~15 % 高い値に制御することが狙いである。この実現のため、車体速度 V より、最適なスリップ率をもった目標駆動輪速度 V_w^* を設定する。 $V_w - V_w^*$ で示されるスリップ量に応じて駆動力制御量を決定し、エンジンコントロールユニットやハイドロリックユニットに指示を出す。

3.4.2 駆動力低減方法

車輪のスリップ率を積極的に制御する機能としての TCS について以下にまとめる。Fig.8 に示すようにエンジン制御、ブレーキ制御、ディファレンシャル制御などの方法があげられる。

- エンジン制御

ドライバーがアクセルの踏みすぎにより駆動輪がスリップしていることを、音、エンジン回転数計、加速感などで感じてアクセルを戻すという操作を機械的に行う方法である。吸入空気量、燃料、点火時期を制御することで速い応答性を得られるが、出力低減の絶対量の制御や、連続的な出力調整が難しいなどの問題がある。

- ブレーキ制御

ブレーキ制御はスリップしている車輪そのものを停止させる方法であり、エンジン制御のみでは不可能な左右駆動輪間のスリップやグリップしている車輪の駆動力を活かしたままスリップを軽減することが可能である。

- ディファレンシャル制御

スリップしている車輪の駆動トルクをグリップしている車輪側へ流すことにより、ブレーキ制御と同様に左右駆動輪間のスリップを低減するものである。駆動トルクの損失はないが過剰な駆動力は制御できないため、エンジン制御と

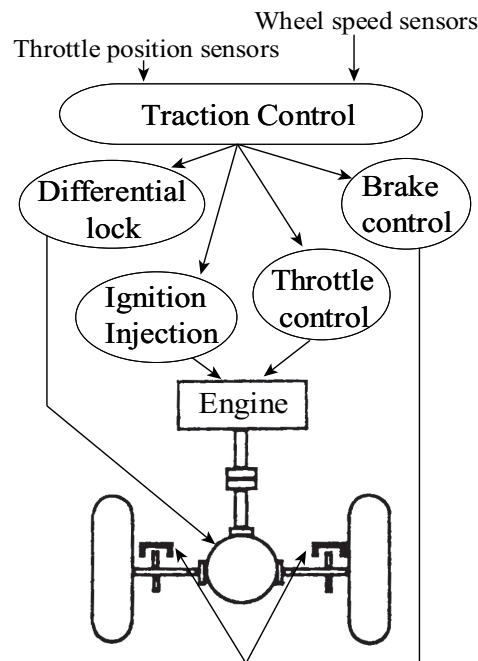


Fig.8: Reduction of the driving force

の併用が必要である。

3.5 VSC

VSC (Vehicle Stability Control) の狙いは、重大事故につながる前の、横滑り不安定現象を抑制することである。Fig.9 において Ball は車両の運動状態を、Bowl は車両性能を表現しており、Ball が Bowl の縁を越えて飛び出すことが操縦不能をイメージしている。一般的な走行状態では、Ball の運動に比べて Bowl は十分に大きく深いいため車両は安定状態にあるが、緊急回避操作での急ハンドルのように Ball の運動が急激になる場合や、氷雪路などを走行している時のように Bowl が小さくなった場合では、Ball が Bowl の縁を越えて操縦不能となる可能性が出てくる。

ABS や TCS は制動、駆動方向での Bowl の縁での限界ガード的な役割を果たすことにより安定性を確保するシステムである。しかし、これらの機能だけでは旋回方向にガード的機能のない部分が残されたままであるため、路面急変などの状況下で車両不安定現象を抑制し、Fig.9 の Bowl の左側のように ABS や TCS と合わせて車両の前後、横方向の全領域において限界ガード的に安定性を確保しようというものである。

前輪横滑りを抑制しコーストレース性を向上させるため、減速力と適度な内向きモーメントを付加するように、また後輪横滑りを抑制し安定性を向上するため、旋回外向きモーメントを付加するように制御が行われる。

4 電気自動車における粘着制御

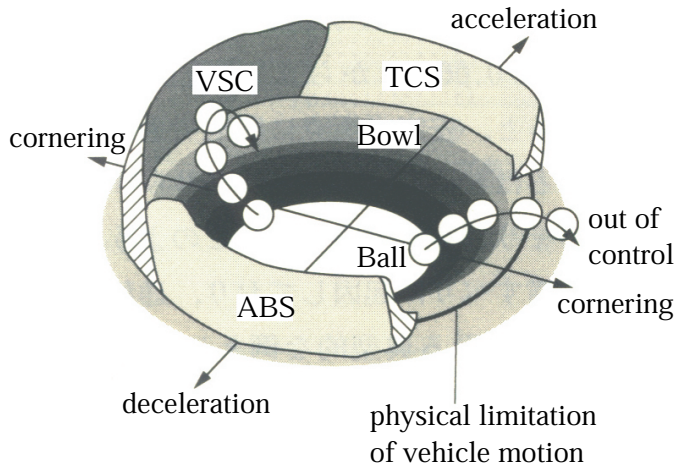
電気自動車には内燃機関にはないモータ独特の次のような特徴がある。

- トルク応答がエンジンより 2 桁速い

安定な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）だけを調節する（すなわち、増粘着制御を行う）ことが可能である。

- 発生トルクが正確に把握できる

タイヤから路面に伝わる駆動力や制動力を容易に推定でき、



Ball : vehicle state
Bowl : vehicle performance

Fig.9: Concept of VSC (Ball in Bowl)

Table.1: Specification of ESTIMA (THS-C)

Curb weight	1850 [kg]
Battery	216 [V], 6.5[Ah]
Front motor generator	13 [kW]
Engine maximum power	96 [kW] / 5600 [r/min]
Engine maximum torque	190 [Nm] / 4000 [r/min]
Rear motor generator	18 [kW]

路面摩擦係数の実時間同定を容易に行える。つまり、ドライバーに対して、リアルタイムで路面の状態を知らせることが可能となる。

- モータを各輪に分散配置可能

4 輪独立駆動にすることで、ヨーレートそのものを制御入力とする新しい制御系を組むことが可能であり、高度なモーション制御が可能になる。エンジンを 4 個用いることは、スペース的にもコスト的にも有り得ないが、電気モータなら可能である。

しかしながら、このような特徴を利用した粘着制御はまだ十分には行われていないのが現状である [5, 6]。次節以降では、ハイブリッド自動車における制御技術の一例を述べ、古くから粘着制御についての研究が行われている鉄道における制御技術について述べる。鉄道における粘着制御の技術が電気自動車にも応用できないかと考える。

5 ハイブリッド自動車における粘着制御

本節では世界で初めて電動 4WD を実用化した TOYOTA のエスティマハイブリッドを取り上げる。エスティマハイブリッドにおける車両制御システムを THS-C (Toyota Hybrid System-CVT) と呼ぶ [7]。車両の仕様を Table.1 に示す。

エスティマハイブリッドは、電動 4WD の他にも電子制御ブレーキシステム ECB (Electronically Controlled Brake system) と呼ばれる 4 輪独立制御の油圧ブレーキとフロント及びリアモータによる回生ブレーキの 2 つの制動力を最適に配分するブレーキシステムを搭載している [8, 9]。この協調機能により、確実な制動性能と高効率のエネルギー回収を高いレベルで両立させている。また、車

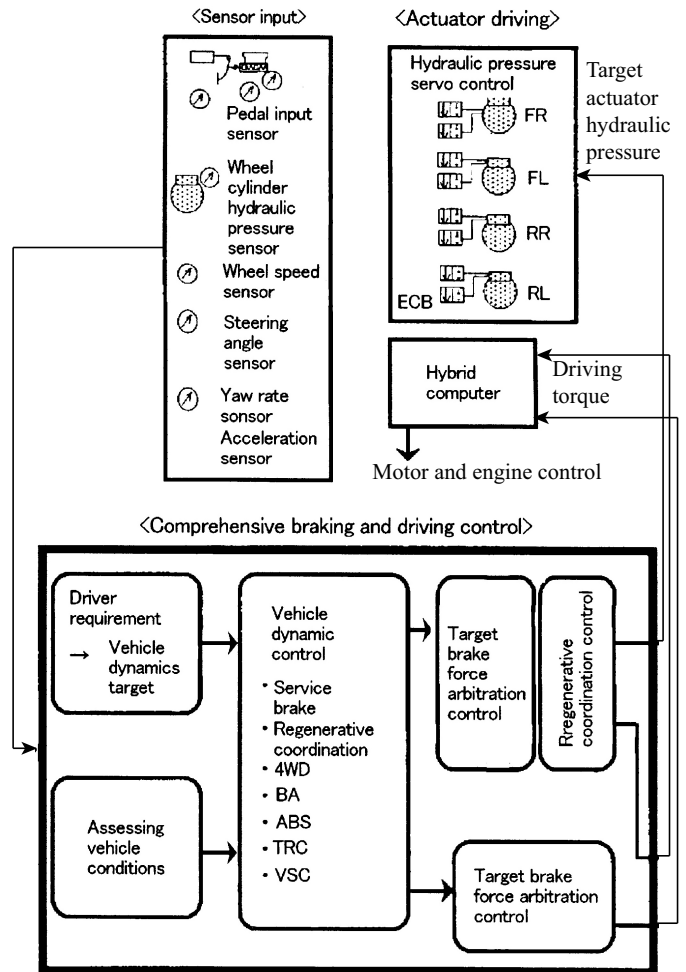


Fig.10: Vehicle dynamics management system processing

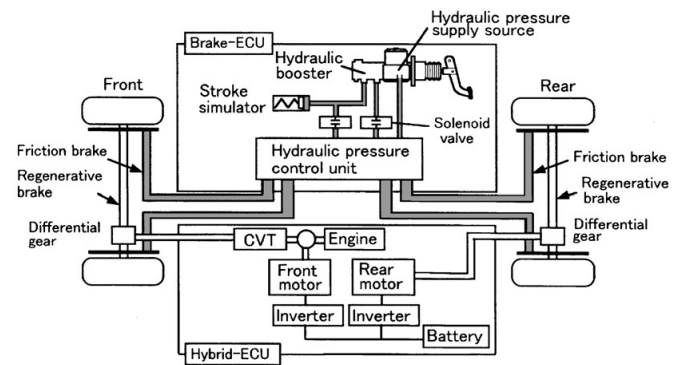


Fig.11: Hardware configuration of the hybrid system and the ECB system

両の操作状態に応じて 4 輪独立制御油圧ブレーキ、EBD 付 ABS、ブレーキアシスト、VSC、TRC を統合制御し、車両安定性を積極的に確保する高度なシステム (Vehicle Dynamics Management system : DVM) を装備している (Fig.10)。

Fig.11 に ECB システムの構成を示す。ハイブリッドシステムは、各車軸を駆動するフロント及びリアモータを含む駆動システムである。フロントユニットでは、エンジンとモータが並列して配置されていて、駆動力は CVT を経由して伝達される。リアユニットはモータとリダクションユニットから構成される。伝達ユニットやプロペラシャフトを必要としないので独立 4 輪駆動が可能となる。

ブレーキシステムは、回生ブレーキと油圧ブレーキ (摩擦ブレー

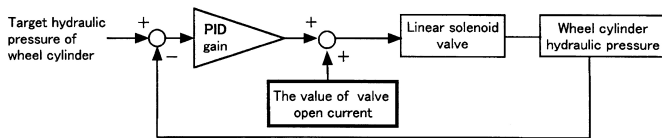


Fig.12: Configuration of hydraulic pressure control

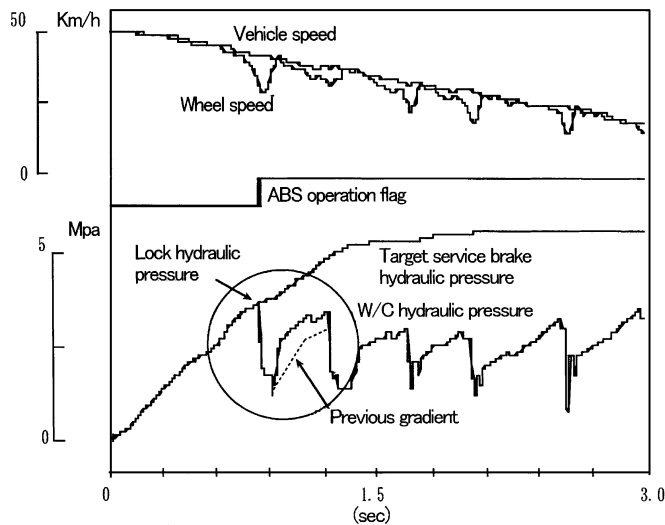


Fig.13: Example of braking efficiency improvement during ABS control

キ)により構成されている。回生協調制御は、回生ブレーキを受け持つハイブリッド ECU と、油圧ブレーキを受け持つブレーキ ECU とで連携して行い、運転者のブレーキペダル操作を電氣的に検出し、それに基づき必要な制動力を油圧ブレーキと回生ブレーキで確保するパイ・ワイヤシステムが採用されている。

油圧ブレーキシステムでは、通常の車両におけるブレーキシステムにストロークシミュレータ、油圧調整部、油圧センサを追加した構成となっていて、油圧調整部では、ホイルシリンダの油圧を回生制動分だけマスタシリンダに発生する油圧から減圧制御する機能を持っている。油圧制御のブロック図を Fig.12 に示す。

ABS 制御においては回生制動を中止し、リニアソレノイド弁（増圧制御用）を全開にして、レギュレータ出力油圧を用いて制御を行っている。つまり、このシステムにおいて ABS は油圧ブレーキのみで行っていることになる。回生ブレーキを用いることで燃費向上に大きく貢献しているわけではないことが分かる。ABS 制御時の様子を Fig.13 に示す。

次に、ハイブリッドシステムによる車両の各運動状態は次のように分類できる。

1. 発進時

- 停車中はエンジンを停止する。
- アクセルを踏み込むとバッテリーからの電力で瞬時にフロントとリヤのモータを駆動し四輪駆動でレスポンスよくスタートする。
- エンジン走行の方が効率の良い運転領域と判断すれば、エンジンを始動し、その出力を CVT（無段変速機）[10] を介して前輪駆動で走行する。

2. 通常走行時及びバッテリー充電時

- 通常走行時は、エンジン動力が CVT を介して前輪を駆動する。

- 必要に応じて、エンジン動力でフロントモータを発電機として駆動し、バッテリーを充電する。

3. 全開加速時

- エンジンによる駆動に加え、バッテリーから電力を供給し、フロントモータを駆動して、前輪の駆動力を増大させる。
- さらに、バッテリーの電力でリヤモータを短時間駆動し、後輪も駆動しアシストする。

4. 軽負荷時

- 低速走行時や緩やかな坂を下る時など、エンジン効率が低下する領域ではエンジンを止め、バッテリーでフロントとリヤのモータを駆動し、四輪駆動で走行する。

5. 減速時・制動時

- 前後輪が各々フロントとリヤのモータを駆動し、回生発電を行い、バッテリーに充電する。

6. 低 μ 路走行時（電気式 4WD システム（E-Four））

- 低 μ 路、すなわち雪道などの滑りやすい路面で前輪のスリップを検知した場合、エンジン動力でフロントモータを発電機として扱い、エンジン出力を吸収することによって前輪の駆動力を低下させる。同時にフロントモータで充電した電力をリヤモータの駆動に使用して、後輪に駆動力を発生させる。すなわち電氣的に 4WD 状態にする。
- 電力の過不足はバッテリーで調整する。
- 前輪の駆動力が大きすぎる場合は、エンジンのスロットルを絞りスリップを制御する。

上述した低 μ 路走行時の車両の動作について、 $\mu = 0.35$ の交差点での左旋回のシミュレーションを行っている (Fig.14)。同図 (a) は VDM を用いた実際の車両データ、(b) は (a) と同様だが 150ms の遅延を持たせてガソリンエンジンと等価な反応速度にした時のデータ、(c) は (a) と同様だが駆動力制御を行わない時のデータ、(d) は (a) から (c) の 3 種のデータにおける目標ヨーレートと比較した実際のヨーレートの制御偏差量を示している。これまでのシステムであっても、ドライバー要求の目標ヨーレートと車両による実際のヨーレート間の制御偏差に従って駆動力トルク制御を達成できているが、VDM では普通のエンジン車両より応答性、線形性に優れたトルク制御が可能なモータの制御によって滑らかな旋回始動性能を実現していることが確認できる。

6 鉄道における粘着制御

6.1 その歴史と最新技術の動向 [11, 12]

鉄道車両の粘着に関する最初の文献は、力行時の空転に関するもので、1852 年の Poirée による走行試験結果報告と言われている。1944 年 Curtius & Kniffler が E19 形電気機関車（4 動軸、4000kW、交流整流子電動機）牽引客車列車にて、機関車の 1 軸の主電動機にのみ給電して、50 回の走行の中で 261 回の空転試験を実施した。試験速度において客車にブレーキをかけると走行速度が低下する。交流整流子電動機は直巻電動機であるから、同一印加電圧では回転速度が下がると電流とトルクは増加する。したがって、このとき機関車のノッチを一定にしておくで引張力が増加する。そして車軸速度と列車速度、引張力の変化から粘着限界を判断している。試験の中で 225 回は粘着限界に達し、そのうち 42 回は直ちに空転を生じた。これらのデータから粘着限界の引張力と軸重から粘着係数を求め、レール乾燥時、湿潤時をともに含む次の粘着係数の実験式を発表している。

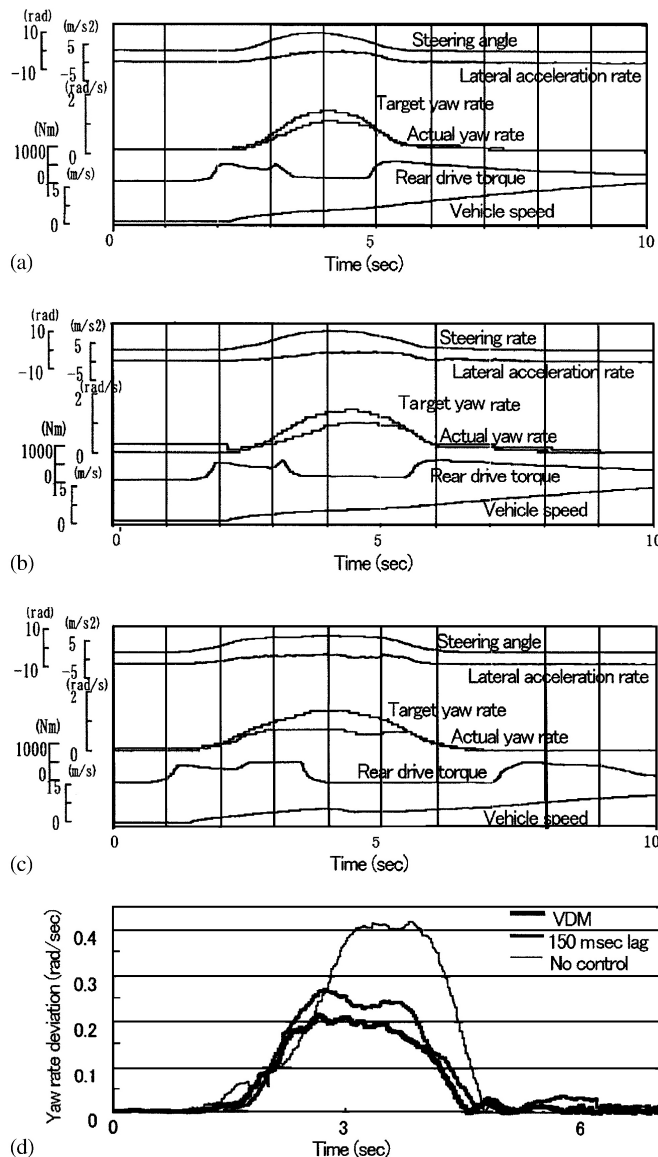


Fig.14: (a) $\mu = 0.35$ actual intersection startoff data. (b) Same as above (150 ms lag). (c) Same as above (no drive force control). (d) Comparison of yaw rate deviations with different controls.

$$\mu_s = \frac{7.5}{V + 44} + 0.16 \quad (2)$$

国内においては1956年から1964年にかけて各種の粘着性能試験が実施され、各車種について粘着係数の実験式が求められている。新幹線電車については、車輪と軌条輪を用いた模型粘着力試験機にて粘着力特性のデータを得て、これにそれまでの在来線における粘着係数の実験式を考慮して次のような粘着係数の計画式が導出され、今日まで用いられている (Fig.15)。

$$\mu = \frac{27.2}{V + 85} \quad (\text{レール乾燥}) \quad (3)$$

$$\mu = \frac{13.6}{V + 85} \quad (\text{レール湿潤}) \quad (4)$$

チョップ制御では駆動電動機の直列接続のためもあるが、同じ直流電動機を用いた交流電気機関車（制御整流器などで電動機電圧の個別制御ができる）に比べると目立って悪い粘着特性に甘んじてきた。しかし、インバータ制御では交流電気機関車並みの特

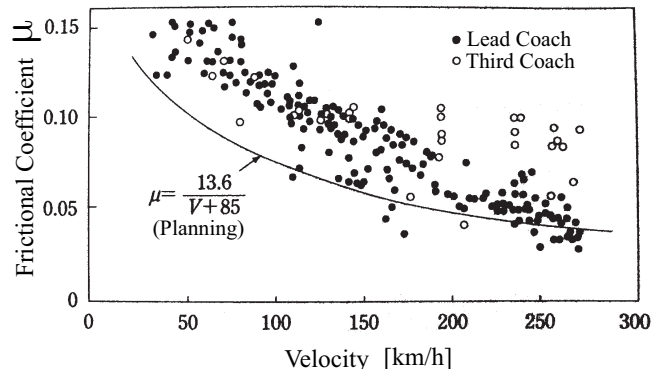


Fig.15: Measurements of Frictional Coefficient with Shinkansen Train

性が得られるのではないかと考えられたが、実際には無理であった。なぜなら、交流電気機関車では直流回路のインダクタンスを大きくして、自己再粘着特性を実現しているために、しばしば空転を繰り返しながらもマクロな特性として高い接線力係数（粘着係数）を得ているのであるが、これを誘導機で真似ることは電動機の力率を著しく低下させるために現実的でないからである。

従って、粘着特性について制御による改善を現実的に進める方が採られ、個別制御（各電動機が専用のインバータを持つ）ばかりでなく並列接続された電動機の一括制御でも、従来よりも電動車比率を減らすことに成功している。

新製車両ではモータの制御にベクトル制御を用いることにより、トルク応答が10ms程度と速く、再粘着制御を行いやすくなってきている。また、速度センサの取り付け時の芯ずれが生じないように配慮され、10年前は100msは必要であった速度検出時間も現在では10ms程度の短時間となり、高精度の速度検出が可能となっている。また、現在ではモータの制御は速度センサレスベクトル制御も使われ始めており、外乱オブザーバーにより空転制御における粘着力を同定し、トルクに急変のない洗練されたものとなっている [13]。この具体的手法について次の小節で述べる。

粘着のメカニズムについても最近になって総合的なシミュレーションが発表されるようになってきた [14]。車輪・レール接触面の三次元での応力と熱の解析などにより走行試験で得られた粘着力特性曲線が計算によって再現できるようになってきている。

滑りに関する考え方も滑らせない制御と滑りを許容する制御ともに存在し、どちらがよいか明確な結論は出ていないが、車輪あるいはレール表面に数 μm の粗さが確保されれば、極わずかな滑りでまだまだ粘着力の向上が図れる可能性がある。

粘着に関する今後の課題としては、自己再粘着特性を持たせた直流電動機式の車両に匹敵する特性を制御によっていかに実現するか、どこまで接近できるかが問われているのである。また、ブレーキにおいては電気ブレーキ応答の高速化に伴い機械ブレーキとの応答速度のギャップが大きくなってきていることから、電気ブレーキの高速応答を活用した滑走再粘着制御も課題となる。既に、LRV（低床路面電車）では通常は電気ブレーキのみを用い、滑走制御も電気ブレーキのみで行う車両が欧州で定着してきている [15]。

6.2 速度センサレスベクトル制御・外乱オブザーバーによる空転再粘着制御

電気車の動輪と車両の運動方程式は1動輪軸に換算したモデルに対して行う。電気車の運動方程式を導くと、電動機の機械系のトルク方程式は(5)式で表される。各記号は、次のように定義する。 W ：電気車の1動輪軸の軸上重量、 $\mu(v_s)$ ：接線力係数、 J ：動輪軸の合成慣性モーメント、 J_m ：電動機の慣性モーメント、 τ_m ：電

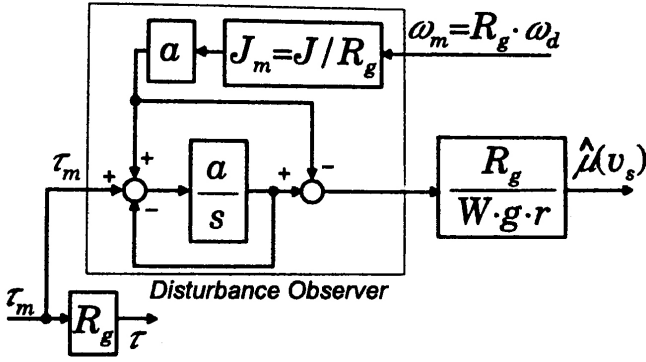


Fig.16: Estimation system of adhesion force coefficient based on disturbance observer

動機の発生トルク, ω_m : 電動機の角速度, r : 動輪半径, R_g : ギヤ比, g : 重力加速度.

τ_c は電動機の負荷トルクであり, 外乱オブザーバーはこの負荷トルクを (6) 式で推定する. $\hat{\tau}_c$ は負荷トルクの推定値, a は外乱オブザーバーの極 (ここでは, $a = 100\text{rad/s}$ に設定している.) である.

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = \tau_m - \tau_c \quad (5)$$

$$\hat{\tau}_c = \frac{a}{s+a} \cdot (\tau_m - J_m \cdot s \cdot \omega_m) \quad (6)$$

これより, 一動輪軸換算における電気車の電動機の運動方程式 (7) 式を得ることができ, 電気車の接線力は (8) 式となる. ゆえに, 接線力係数 $\mu(v_s)$ は外乱オブザーバーの負荷トルク推定値から, (9) 式のように推定できる. 以上より, 外乱オブザーバーによる接線力係数推定器は Fig.16 のように構成される.

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = \tau_m - \frac{1}{R_g} \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (7)$$

$$\tau_c = \frac{1}{R_g} \mu(v_s) \cdot W \cdot g \cdot r \quad (8)$$

$$\hat{\mu}(v_s) = \frac{R_g}{W \cdot g \cdot r} \hat{\tau}_c \quad (9)$$

また, 速度センサレスベクトル制御では, インバータの出力電圧 $\mathbf{v}$ と出力電流 $\mathbf{i}$ から, 2つの誘導電動機の平均的速度を演算する.

$$\hat{\Psi}_{2v} = \int \left[\frac{L_2}{M} (\mathbf{v} - R_1 \mathbf{i}) \right] dt - \left(\frac{L_1 L_2}{M} - M \right) \mathbf{i} \quad (10)$$

$$\hat{\omega}_s = R_2 \frac{M(\Psi_{2v\alpha} i_\beta - \Psi_{2v\beta} i_\alpha)}{L_2(\Psi_{2v\alpha}^2 + \Psi_{2v\beta}^2)} \quad (11)$$

$$\hat{\omega}_m = \hat{\omega} - \hat{\omega}_s \quad (12)$$

$$\hat{\omega} = \frac{d}{dt} \left(\tan^{-1} \frac{\Psi_{2v\alpha}}{\Psi_{2v\beta}} \right) \quad (13)$$

速度演算は (10) 式で得られた電圧モデルの二次鎖交磁束 $\hat{\Psi}_{2v}$ をもとに, 平均的なすべり角速度 $\hat{\omega}_s$ を (11) 式により求める. よって, 2つの誘導電動機の回転子の平均的な回転角速度 $\hat{\omega}_m$ は (12) 式より求める. $\hat{\omega}$ は (13) 式で得られる $\hat{\Psi}_{2v}$ の回転角速度である. なお, $\Psi_{2v\alpha}$, $\Psi_{2v\beta}$ は Ψ_{2v} のインバータ出力の 2 相静止座標上 ($\alpha-\beta$)

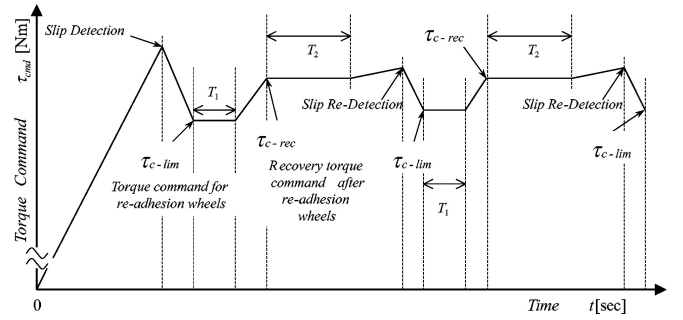


Fig.17: Torque command pattern of anti-slip re-adhesion

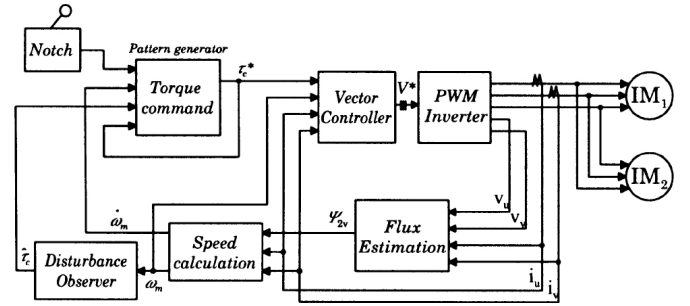


Fig.18: Total structure of re-adhesion control system

の各成分, i_α , i_β は同様に $\mathbf{i}$ の各成分である. このように速度推定をインバータ電流 $\mathbf{i}$ の瞬時値から行うために遅れ要素を持たない.

この手法の空転検知には, 速度推定で演算された誘導機の軸加速度推定値 $\hat{v}_d$ を用いる. 従来から用いられている PG センサの速度変化率による検知方式に比べて, 約 200ms 程度検知時間を短縮化した空転検知が可能となった. これにより, 空転速度が増大する以前にトルク制御を行うことができ, 再粘着のために過剰なトルク変動を抑制することができる.

以上の空転検知方式で Fig.17 の再粘着制御トルク指令パターンを適用する. 空転を検知すると τ_{c-lim} までトルクを引き戻し T_1 間その値を保ち再粘着を待つ. その後, 空転検知時の接線力推定値 $\hat{\tau}$ と同等の τ_{c-rec} までトルク指令を戻し加速度を高めると共に乗り心地への影響を抑えるようにする. Fig.18 には再粘着制御系の全体構成を示す.

台車試験装置 (Fig.19) の実験結果を Fig.20 に示す. この時の各パラメータを Table.2 及び 3 に示す. この実験は動輪・軌条輪間に石鹼水を散布しながら行っている. 実験結果より, 軌条輪速度に対して動輪の推定速度が約 1km/h 程度上回る程度で大きな空転を発生せず, 空転検知時のトルク分電流指令値は空転検知時の引き下げ量が僅少であるにもかかわらず確実に再粘着できている. 再粘着後のトルク分電流指令値は空転検知時のそれに近い値となっている. このため, 再粘着に伴う接線力係数の推定値の落ち込み量も少なくなっており, 乗り心地を損なうことなく粘着力の有効利用可能な再粘着制御が行われていることが確認できる.

また, この手法では台車試験装置を用いて実験を行っているが, そのままの形で実車両である 205 系 5000 番代電車 (JR 東日本山手線に使用されていた車両をインバータ制御化改造して武蔵野線に転用した営業車両である. 4M4T 8 両編成.) に適用し, 95% 前後の高い粘着力の利用率を得ながら実現されている [16].

この手法のもたらす結果として, 通勤電車を安定かつ瞬時に加減速することによって, 効率的かつ快適に輸送力を増強できるなどの鉄道における利益だけでなく, この粘着制御系をアンチスキッ

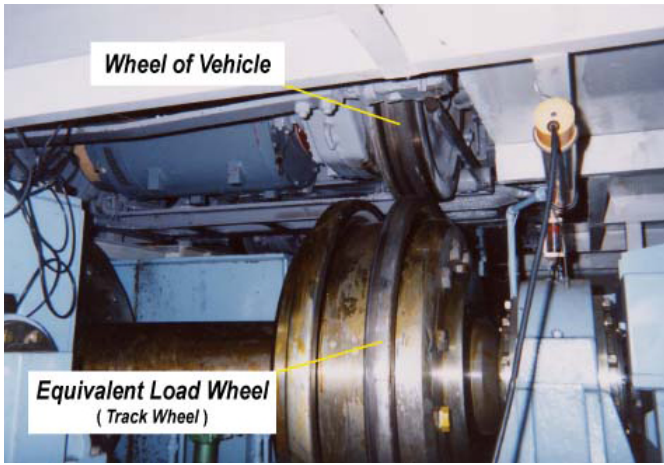


Fig.19: Bogie test equipment

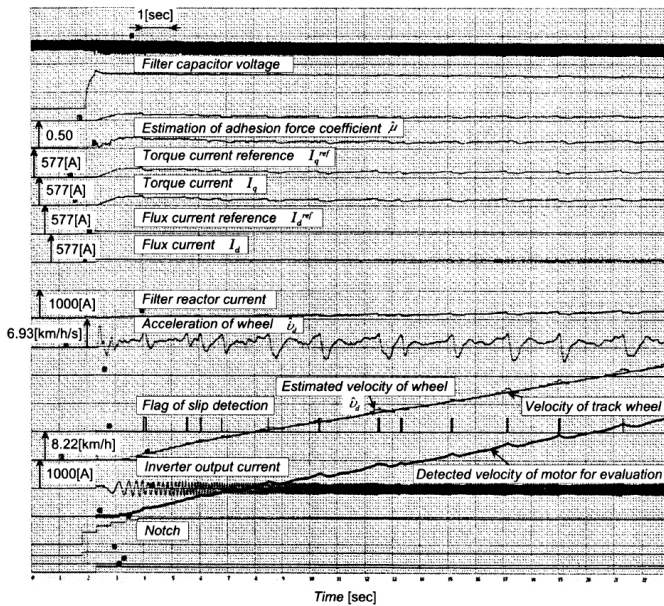


Fig.20: Experimental results of re-adhesion control using tested bogie of electric motor coach

ド制御すなわち ABS として技術拡張することにより電気自動車の粘着制御として応用することができるであろう。

7 むすび

本稿では、自動車における運動制御技術や鉄道における粘着制御の研究動向を紹介し、電気自動車の特徴を活かした粘着制御技術への応用可能性を見出した。こうした技術が、部品数減少に伴う製品コスト削減や車両の運動制御技術の向上などいろいろな面で内燃機関の技術を凌駕するのは、時間の問題であり、モーターショーが本当の意味でのモータのショーになる日は近い。

参考文献

- [1] Shiro Matsugaura, Kiyomoto Kawakami, Hiroshi Shimizu, “Evaluation of Performances for the In-Wheel Drive System for the New Concept Electric Vehicle KAZ”, in *Proc. EVS19*, Pusan, 2002.
- [2] Chiu-Feng Lin, A. Galip Ulsoy and David J. LeBlanc, “Vehicle Dynamics and External Disturbance Estimation for Vehicle Path Prediction”, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 8, No. 3, pp.508–518, 2000.
- [3] 小口泰平, “ボッシュ自動車ハンドブック第2版 / Bosch Automotive Handbook”, 山海堂 / Robert Bosch GmbH, 2003.

Table.2: Parameters of tested electric motor coach

Gear ration	R_g	5.5
Wheel radius	r	0.41 [m]
Weight	W	5950 [kg]
Total inertia moment	J	159.18 [kg · m ²]

Table.3: Parameters of induction motor

Pole pair number		2
Rated line voltage		1100 [V]
Rated current		80 [A]
Rated output		120 [kW]
Primary resistance	R_1	0.182 [Ω]
Secondary resistance	R_2	0.257 [Ω]
Mutual inductance	M	0.06341 [H]
Primary self inductance	L_1	0.001738 [H]
Secondary self inductance	L_2	0.001738 [H]

- [4] Saied Taheri, M. Bahrami and A. Safari, “A New Control Strategy for Anti-Lock Braking Systems”, SAE980247.
- [5] Remus Pusca, Youcef Ait-Amirat and Alain Berthon, “Slip Control Strategy of an Electrical Four Wheel Drive Vehicle”, in *Proc. EVS18*, Berlin, 2001.
- [6] Parvin Khatun, C M Bingham, P H Mellor, “Comparison of Control Methods for Electric Vehicle Antilock Braking/Traction Control Systems”, SAE2001-01-0596.
- [7] Hiroatsu Endo, Masatoshi Ito and Tatsuya Ozeki, “Development of Toyota’s transaxle for mini-van hybrid vehicles”, JSAE20034017.
- [8] Wolf-Dieter Jonner, Hermann Winner, Ludwig Dreilich and Eberhardt Schunck, “Electrohydraulic Brake System—The First Approach to Brake-By-Wire Technology”, SAE960991.
- [9] Masayuki Soga, Michihito Shimada, Jyun-Ichi Sakamoto and Akihiro Otomo, “Development of vehicle dynamics management system for hybrid vehicles: ECB system for improved environmental and vehicle dynamic performance”, JSAE20024667.
- [10] Masabumi Nishigaya, Tadashi Tamura, Hideki Yasue, Shinji Kasuga and Masami Sugaya, “Development of Toyota’s New Super CVT”, SAE2001-01-0872.
- [11] 渡邊朝紀, “鉄道車両の空転・滑走と制御”, *自動車技術*, Vol. 57, No. 10, pp.52–57, 2003.
- [12] 河村篤男, 竹内恵一, 古谷勇真, 曹梅芬, 高岡洋介, 吉本貫太郎, “粘着試験装置を用いた接線力係数の測定とそれに基づく最大接線力制御”, *電気学会論文誌 D*, Vol. 123, No. 8, pp.885–893, 2003.
- [13] Satoshi Kadowaki, Kiyoshi Ohishi, Ichiro Miyashita and Shinobu Yasukawa, “Re-adhesion Control of Electric Motor Coach Based on Disturbance Observer and Sensor-less Vector Control”, in *Proc. IEEE/IAS Power Conversion Conference (PCC-OSAKA2002)*, pp.1020–1025, Osaka, 2002.
- [14] O. Polach, “Rad-Schiene-Modelle in der Simulation der Fahrzeug und Antriebsdynamik”, *Elektrische Bahnen*, Vol. 99, No. 5, pp.219–229, 2001.
- [15] H. J. Schwarz, R. Pfeiffer, “Radschlupfregelung für Stadtbahn-Triebwagen”, *Eisenbahn Technische Rundschau*, Vol. 49, No. 10, pp.664–672, 2000.
- [16] 畑正, 廣瀬寛, 門脇悟志, 大石潔, 飯田哲史, 高木正志, 佐野孝, 保川忍, “速度センサレスベクトル制御・外乱オブザーバによる空転再粘着制御の実車両への適用とその評価 — 205 系 5000 番電車における実例 —”, 平成 15 年電気学会産業応用部門大会, 3-11, pp.III-93–III-98, 2003.