

(様式5)

学 位 論 文 要 旨

西暦 2025年 1月 8日

学位申請者
(高橋 空路) 印

学位論文題目

タイヤモデルを使ったトルク関数制御で電気自動車を安定走行させる研究

学位論文の要旨

電気自動車はガソリン車と比較してきわめて高いトルク応答性を有しており、ガソリン車が500msだと仮定すれば電気自動車は5msである。この利点を活用して、きめ細かな車両運動制御を実現することができる。本論文では、後輪1輪駆動の電動カートを制御対象として、「あらゆる路面でリアルタイム高速安定制御を実現すること」を目的に研究を行なった。目的を達成するには、「路面状況に応じたトルク制御」と「タイヤ-路面摩擦をリアルタイムで同定する手法」の2つの要素の確立が必要となる。(1章)

2章では、2つの要素を実現するために、従来提案されてきた手法を詳細に調べた。また、従来提案されてきた手法の課題を明確化した。「路面状況に応じたトルク制御」では、車両の走行が不安定となるスリップ現象に着目し、従来提案されてきたスリップ抑制法について調査し、課題を明確化した。数々の走行条件の中でスリップ現象に着目し、従来の制御手法について詳細な調査を行い、課題を抽出した。その結果、コントローラ負荷増大、モデル精度が悪い場合は制御が十分に作用しない、ゲインの調整を誤ると制御系が発散するといった課題があることが判明した。そこで、これらの課題を解決するトルク関数制御に着目し、従来のトルク関数を登坂に適用すると、トルク指令値と0値を繰り返してスリップと後退を繰り返すことが判明した。

また、「タイヤ-路面摩擦をリアルタイムで同定する手法」は現在多く提案されてきた2つの手法に着目し、その詳細を調査した。カルマンフィルタは再帰的に繰り返し推定できるという利点を持つが、カルマンゲインの調整が必要であり、初期値の誤差が大きいという課題を持つことが判明した。人工ニューラルネットワーク(ANN)は設計次第で非常に高精度に同定できるシステムを設計可能であるという利点を持つ。その反面、高精度なモデルを作るためには中間の計算処理を増やし、多重配置する必要があるため、システムが複雑化しやすいという課題があると判明した。(2章)

3章から6章では「路面状況に応じたトルク制御」を実現することを目標に研究を行なった。まず、3章では従来のトルク関数制御で課題となっている0 Nmのトルクをバイアス値に置き換えることで後退防止を実現するバイアストルク関数制御を導入した。また乗員を伴うエコカーレース用の電気自動車を制御対象とし実験を行ない、有効性を検証した。実験では加速開始から0.5秒以降にスリップ率は0.1に抑制され、スリップ現象が抑制された。また、3s後の車体速度は1.7 m/sとなり、トルク関数制御なしと比較して21%上昇した。これらの結果はバイアストルク関数制御が登坂での後退抑制と、スリップ抑制に対して有効であることを示す。(3章)

第4章ではバイアストルク関数制御について、シミュレーションで実験結果の裏付けが確認でき、シミュレーションと実験の結果が一致したことから、バイアストルク関数制御の有効性がシミュレーションを通じて示された。定常動作点解析と時間変化シミュレーションによ

るバイアストルク関数制御の有効性検証を行なった。定常動作点解析では、車両の定常動作点はスリップ率0.1の一点となり、車両の安定性が示された。時間変化シミュレーションでは実験とほとんど一致した結果が得られ、シミュレーションの妥当性が示された。これらの結果からバイアストルク関数制御が登坂での後退抑制と、加速性能向上に対して有効であることをシミュレーションによって示した。(4章)

3章と4章ではバイアストルク関数制御の有効性が示された。しかしながら、最適なバイアストルクを決定する手法は、いまだ確立されていない。そこで、5章では車両の状態変化を明確にする方法としてPhase Plane解析による検証を導入した。

5章では、最適なバイアストルクの決定手法確立を目的に、駆動輪速度と車体速度の初期状態からの変化をベクトルで表現したPhase Plane解析を用いて、スリップ状態からの復帰性能を評価した。復帰性能について評価するうえで、駆動輪速度の変化が0となるベクトルに着目した。このベクトルは車体速度の変化成分のみ有しているため、スリップからの復帰性能向上の効果を期待できる。バイアストルクが13.01 Nmのバイアストルク関数制御では、0.76以上のスリップ率で駆動輪速度の変化が0となるベクトルが多く存在した。結果として、加速性能の優れている制御法はスリップからの復帰性能も高いことが示された。

これまでのバイアストルク関数制御では、駆動輪速度の変化が0となるベクトルが多く存在することが、最適なバイアストルクの条件であると明らかとなった。しかしながら、バイアストルク関数制御では、バイアストルクが定数であるため、駆動輪速度の変化が0となるベクトルが特定のスリップ率以上でしか発生していない。この結果はバイアストルクの最適化が十分に果たされていないことを示している。したがって、6章ではバイアストルクの最適化条件を検討した。また、検討した最適化条件を適用した駆動力バイアストルク関数制御を導入し、バイアストルクを最適化した。(5章)

6章ではバイアストルクの最適化条件として、駆動輪速度の変化が0となるベクトルの条件を検討した。また、検討した条件を適用した駆動力バイアストルク関数制御を導入し、バイアストルクを最適化した。運動方程式を計算して、駆動力と駆動輪半径の積がバイアストルクの最適化条件であることを見出した。有効性の検証では、1°の勾配で車両の加速性能を評価した。定常動作点解析では、タイヤ路面間の摩擦力よりもわずかに小さいトルクを印加し続けていることが示され、限界までトルクを上昇させていることが判明した。Phase Plane解析では、垂直ベクトルは0.11から1の間のスリップ率で生成され、バイアストルクの最適化条件を満たしたトルクが幅広いスリップ率で生成された。時間変化のシミュレーションでは、これまでのバイアストルク関数制御で0.7秒要していたスリップからの復帰が0.55秒に短縮された。3秒時の車速は駆動力バイアストルク関数制御を使用した場合は1.9 m/s、従来のこれまでのバイアストルク関数制御を使用した場合は1.8 m/sであった。実験では、3秒時の車速は駆動力バイアストルク関数制御を使用した場合は2.1 m/s、これまでのバイアストルク関数制御を使用した場合は1.7 m/sであった。これらの結果は、駆動力バイアストルク関数制御が復帰性能と加速性能を向上させることを示している。結果として、6章では研究目的の達成のために必要な要素である「路面状況に応じたトルク制御」が確立された。

従来の手法と比較すると、駆動力バイアストルク関数制御は四則演算と条件分岐、三角関数があれば実装することができ計算量も少なく、コントローラ負荷も小さい。また、タイヤ-路面摩擦のリアルタイム同定は必要であるものの、トルクの取りうる範囲が0 Nmから指令値であり、発散リスクが無い制御手法である。また、タイヤ-路面間の路面摩擦関数が明確であればあらゆる路面やタイヤで使用できるという利点もある。(6章)

6章では研究目的の達成のために必要な要素のひとつである「路面状況に応じたトルク制御」が確立された。一方で、ここで得られた最適バイアストルク条件は、路面摩擦関数に大きく依存することが明らかになった。タイヤ-路面間の路面摩擦関数をリアルタイムで同定する手法の確立が必要となったため、7章では新たに路面摩擦関数を同定する手法を検討した。

そこで7章ではもうひとつの必要な要素である「タイヤ-路面摩擦をリアルタイムで同定する手法」の確立を目標に、わずか1回の走行かつ少ないデータ点数で路面摩擦関数を同定できる運転データ最小二乗法を新たに提案した。3種類のタイヤの約1,000の走行データから路面摩擦関数を同定した。運転データ最小二乗法にはカルマンフィルタや人工ニューラルネットワークと比較して、少ないデータ点数で同定可能な特徴がある。また、アンダーサンプリング

と最小二乗法で構成された単純なシステムを使用して同定することができる。駆動輪速度と車体速度の走行データは、0から0.8までの広いスリップ率で5秒間にわたって取得された。さらに、車両モデルを使用して走行データから路面摩擦関数同定に必要な $\mu-\lambda$ 特性を抽出した。抽出された $\mu-\lambda$ 特性は0.05から0.2の間のスリップ率で最大値を持ち、典型的なタイヤ特性を示した。また、走行データは0から0.05までのスリップ率のグループに60%集中する偏りがあり、データの不均衡を解消するためにアンダーサンプリングによってデータポイント数を削減した。また、アンダーサンプリングによって、データ数を削減することで、計算速度を速くすることができ、よりリアルタイムで同定することが可能となる。最小二乗同定では、走行データと路面摩擦関数の差を最小化する最適化問題を解くことで路面摩擦関数を同定した。路面摩擦関数を同定した結果、RMSEは0.03314であった。さらに、同定結果を典型的な摩擦滑り曲線と比較すると、極大点の摩擦係数の最大値は0.3~0.5の間、極大点のスリップ率は0.05から0.2の間に位置し、両方の特性が一致していた。この結果、走行データ最小二乗法の汎用性が示された。以上の結果から、リアルタイムでの路面摩擦関数の同定ができるようになり、研究目的の達成のために必要な要素のひとつである「タイヤ-路面摩擦をリアルタイムで同定する手法」が確立された。(7章)

8章にてこれまでの研究をまとめた。6章では、「路面状況に応じたトルク制御」が確立された。一方で、7章から「タイヤ-路面摩擦をリアルタイムで同定する手法」が確立され、研究目的であった「あらゆる路面でリアルタイム高速安定制御を実現すること」が実現した。これらの研究成果は電気自動車の安定走行制御の発展に大きく寄与するものである。(8章)

(様式6)

S u m m a r y

Applicant for degree :

(Takahashi Soramichi)

Title of thesis :

Study on Stable Driving of Electric Vehicles by Torque Function Control Using Tire Models

We propose the driving force bias torque function control (DF-B-TFC) and the driving data least squared method (D-LSM) to establish the real-time, high-speed, and stable control for electric vehicles (EVs) in any road surfaces. In addition, we confirmed its effectiveness using the EV starting on a 1-degree uphill road.

In the DF-B-TFC, the optimized bias torque is given by multiplying the wheel radius and the driving force. It also generates the vectors without the differential of drive wheel speed between the slip ratio of 0.11 to 1. When using the DF-B-TFC, the recovery time from slip state becomes 0.15 s shorter, and the vehicle speed at 3 s becomes 0.4 m/s higher compared with the fixed bias torque. These results indicate that the DF-B-TFC has the high recovery performance from slip state.

However, bias torque depends on the driving force, it also depends on the friction-slip characteristics of tires. Therefore, the real-time identification method of the friction-slip characteristics is needed. To solve this problem, we also propose the D-LSM. The drive wheel speed and the vehicle speed are measured for 5 s, and the 1000 driving data are recorded. The friction-slip characteristics are identified by the undersampling and the least squared method. In the undersampling, driving data is thinned out, and the number of data is smoothed for each 0.05 of the slip ratio. The undersampled data is used for least square identification. By identifying the 3 types of tires, the root mean squared error is 0.033 which is improved from the conventional identification method. This result indicates that the D-LSM is effective for the real-time identification of the friction-slip characteristics.

As a result, these results indicate that the DF-B-TFC and the D-LSM are effective for the real-time, high-speed, and stable control in any road surfaces.