

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560221

研究課題名（和文） 電気自動車におけるスリップ率最小化トルク配分とエネルギー節減効果

 研究課題名（英文） Torque Distribution for Slip Ratio Minimization  
in Electric Vehicles and Its Energy Saving Effects

研究代表者

西原 修 (OSAMU NISHIAHRA)

京都大学・大学院情報学研究科・准教授

研究者番号：00218182

研究成果の概要（和文）：電気自動車の走行距離は充電容量の制約を受けやすいため、本研究課題では、タイヤと路面のスリップによるエネルギーの散逸に着目し、これを低減するためのタイヤ力配分について検討した。四輪駆動方式での制駆動力配分最適化により、二輪駆動方式と比較した加減速時のスリップによるエネルギー消散の低減効果が確認された。旋回を含めた走行条件においてタイヤ力の最適配分を決定し、直接ヨーモーメント制御の効果について調べた。

研究成果の概要（英文）：Because the one-charge mileage of an electric vehicle is susceptible to constraints on battery capacity, in this study, we examined the tire force distribution, focusing on the energy dissipation due to slippage between the road surface and tires to reduce energy loss. We found that, in comparison to a two-wheel drive system, the optimization of the longitudinal force distribution in a four-wheel drive system considerably affected energy savings. Under more generic driving conditions, such as acceleration/deceleration during turning, we determined the optimal tire force distribution and examined the effects of direct yaw-moment control.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22年度	1,400,000	420,000	1,820,000
23年度	1,000,000	300,000	1,300,000
24年度	80,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・”機械力学・制御”

 キーワード：電気自動車，スリップ損失，制駆動力配分，回生制動，車両運動統合制御，  
四輪駆動車両，操縦安定性，インホイールモータ

## 1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素排出量の削減目標，原油価格の高騰などの背景や，バッテリーの技術革新などにより，電気自動車への関心が高まっている。制駆動力配分制御は操縦安定性の向上の観点など安全面で議論されているが，エネルギー面については，インバーターやモータ，バッテリーの効率が主眼となり，スリップ損失

の検討が不足するように思われた。タイヤ力を発生させるときは，必ずタイヤと路面間でスリップが生じて，スリップ損失がおきている。そこで，スリップによるエネルギー損失をできるだけ減少させるためのタイヤ力配分を研究課題として選ぶこととした。

## 2. 研究の目的

本研究では、モータ駆動の特性を反映した精密な制駆動力配分をエネルギーの観点から検討するもので、航続距離の延長などを含め、電気自動車への関心の要因となっているエネルギー効率を向上させるために、スリップ損失に着目し、駆動時のロスや、回生制動時の発電効率向上のための方策を探り、その効果評価を行うことを計画した。

## 3. 研究の方法

四輪駆動四輪操舵車両、二輪駆動四輪操舵車両などを仮定し、車体とタイヤについての力学モデルからスリップによるエネルギー散逸を表現する目的関数を導出した。四輪駆動車両では、四輪独立制駆動力配分、二輪駆動車両では、後輪、あるいは前輪左右輪の独立制駆動力配分を仮定した。操舵については、四輪アクティブ操舵が行われるとした。

タイヤモデルとしては線形タイヤモデルとブラシモデルを併用した。タイヤモデルにより、スリップ損失を評価し、それを最小化するスリップ率から、タイヤ力配分を決定するという方法を用いた。タイヤモデルはスリップ率や横滑り角とタイヤ力の関係を与えるから、タイヤ力が与えられると、スリップ率や横滑り角が決まる。

スリップによるエネルギー損失率は、タイヤ力とスリップ速度の内積となる。そこで、四輪についての損失率の和を目的関数とする最適化問題として、例えば、四輪駆動車両なら四輪のスリップ率と前後輪の操舵量を決めて、車体全体での総制駆動力、総横力、総ヨーモーメントなどの走行条件のもとで、各輪のスリップ率と前後輪の操舵量を決定変数とする最小化問題として定式化した。

## 4. 研究成果

上述の方法で検討を重ねた結果、加減速を伴う旋回時について代数解を得た。まず、左右の1/2車体について、前後輪のスリップ率を等しくする解（スリップ率均等化）が得られた。ドライビング/ブレーキングスティフネスの荷重依存性を考慮すると、制駆動力はスティフネスに比例して発生することになり、前後輪が等速となる回転制御により実装できる。

横力配分については、直接ヨーモーメント成分の最適化を経由して最適解を求めた。これは前後輪の横力目標値として得られるため、実装時には、所定の横力となるように操舵制御を行う必要がある。線形タイヤモデルなどを仮定すれば、舵角指令値を得ることもできる。

エネルギー散逸の減少という観点からは、前後輪のスリップ率均等化の効果が高い。二輪駆動方式と比した四輪駆動方式では、加速時

のスリップによる損失が kW 単位で発生する可能性が確認された。直接ヨーモーメント制御(DYC)の効果も最適化により確認できたが、DYC が有効となるのは、車体のヨーモーメントが必要な過渡状態に限られ、DYC を用いない場合との差は、数十から数百 W 程度に留まる。

走行中は加速抵抗、空気抵抗、転がり摩擦などで多くのエネルギーが消費され、定常走行においても数 kW 程度は当然となる。そのため、実用的には、二輪駆動方式と比した四輪駆動方式の有効性が有意な違いとなる。

実装時においては、二輪駆動と四輪駆動では、モータの個数を始めとして、駆動系、制御回路の差異が大きくなり、これらによるコスト、重量、容積などの影響も考慮しなければならない。本研究課題では、スリップ損失に限定して検討していることに注意が必要である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線) 研究代表者による車両運動制御関係の論文を列挙する。本研究課題と関連性が深い論文は、学会発表の1～8, 12, 雑誌論文の, 1, 5 である。学会発表の1, 2 はとりわけ関連が深く、本報告書はほぼこの二件の発表に沿ってまとめた。

[雑誌論文] (計 8 件)

1. タイヤ・ワークロードの Minimax 規準による左右等角四輪操舵と四輪独立制駆動力配分の厳密な最適化, 西原 修, 東野慎平, 日本機械学会論文集 (C 編) 査読あり, Vol. 79, No. 799 (2013), pp. 629-644.
2. オブザーバによる横風外乱推定および電動パワーステアリングによる補償制御, 北野弘明, 西原 修, 栗重正彦, 松永隆徳, 日本機械学会論文集 (C 編) 査読あり, Vol. 78, No. 795 (2012), pp. 3715-3729.
3. Estimation of Road Friction Coefficient Based on the Brush Model, Transactions of the ASME, O. Nishihara, M. Kurishige, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Volume 133, Issue 4, 041006, 査読あり (2011).
4. ステアリング自己復帰性を考慮したトーションバー減衰係数の設定指針の解析的導出, 栗重正彦, 西原 修, 熊本博光, 日本機械学会論文集 (C 編) Vol. 77, No. 777, 査読あり (2011), pp.

1813-1823.

5. 四輪独立操舵車両における横力と制駆動力の動的最適配分(タイヤ力配分パターンと最適性規準法), 西原 修, 日本機械学会論文集(C編) Vol. 76, No. 772, pp. 3577-3586, 査読あり (2010).
6. 位相進み補償器を用いた外乱オブザーバおよび電動パワーステアリング向けモータ電流制御への適用, 栗重正彦, 西原 修, 熊本博光, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 76, No. 770, 査読あり, (2010), pp. 2568-2577.
7. A New Control Strategy to Reduce Steering Torque Without Perceptible Vibration for Vehicles Equipped With Electric Power Steering, M. Kurishige, O. Nishihara, H. Kumamoto, Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Volume 132, Issue 5, 054504, 査読あり (2010)
8. 等方性ブラシモデルにおける接地圧の四次曲線分布とグリップマージン推定, 西原 修, 中嶋 大, 野田真太郎, 栗重正彦, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 76, No. 765, 査読あり (2010), pp. 1353-1361.

[学会発表] (計 12 件)

1. Optimum Distribution of Lateral And Traction/braking Forces for Energy Conservation, O. Nishihara, 7th IFAC Symposium on Advances Automotive Control, Tokyo, 査読あり (2013).
2. Slippage equalization of four wheel drive vehicle for energy loss minimization, O. Nishihara, Y. Yoneima, Proc. of FISITA 2012 World Automotive Congress, Beijing (PRC), 査読あり (2012).
3. Exact Solution to Four-wheel Independent Driving/Braking Force Distribution and Direct Yaw-moment Optimization with Minimax Criterion of Tire Workload, O. Nishihara, S. Higashino, Proc. of AVEC'12 The 11th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Seoul (KOREA), 査読あり (2012).

4. 横力と制駆動力のリアルタイム最適配分による電気自動車の低消費電力化, 西原 修, 東野 慎平, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2012 講演論文集, 査読なし (2012).
5. 四輪操舵車両における独立制駆動力配分の最適化手法と計算量, 西原 修, 山辺勇樹, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2012 講演論文集, 査読なし (2012).
6. タイヤ・ワークロードの Minimax 規準によるタイヤ力配分の厳密解法, 西原 修, 東野慎平, 山辺勇輝, 自動車技術会学術講演会前刷集 20125354, 査読なし (2012).
7. 操舵と制駆動力配分により旋回する電気自動車の低消費電力化, 松本大樹, 西原 修, 日本機械学会 第 20 回 交通・物流部門大会 TRANSLOG 2011 講演論文集, 査読なし (2011).
8. タイヤ・ワークロードの Minimax 規準による四輪独立制駆動力配分とヨーモーメント最適化, 西原 修, 東野慎平, 日本機械学会 2011 年度年次大会 講演論文集, 査読なし (2011).
9. 運転者による車両操縦動作のモデリングと安定度指標, 西原 修, 才木一志, 日本機械学会 2011 年度年次大会 講演論文集, 査読なし (2011).
10. 電動パワーステアリングを用いた横外乱推定および補償制御, 北野弘明, 西原 修, 栗重正彦, 松永隆徳, 日本機械学会 2011 年度年次大会 講演論文集, 査読なし (2011).
11. アクティブ操舵車両における運転者の刺激応答時間補償制御, 西原 修, 池内伸次, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2011 講演論文集, CD-ROM, 査読なし (2011).
12. 旋回時の制駆動力配分による電気自動車の低消費電力化, 松本大樹, 西原 修, 日本機械学会関西支部第 86 期定期総会講演会 講演論文集, 査読なし (2011).

[図書] 該当なし

[産業財産権] 該当なし

[その他]

研究代表者の個人 Web ページ  
<http://libra.sys.i.kyoto-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西原 修 (OSAMU NISHIHARA)  
京都大学・大学院情報学研究科・准教授  
研究者番号：00218182

(2) 研究分担者 該当なし

(3) 連携研究者 該当なし

### 研究協力者

京都大学大学院情報学研究科システム科学  
専攻修士課程に在学していた大学院生の協  
力を得た。おもな協力者は以下の3名である。

熊澤 卓真 (TAKUMA KUMAZAWA)  
在学期間 (2009年4月 ~ 2011年3月)

松本 大樹 (DAIKI MATSUMOTO)  
在学期間 (2010年4月 ~ 2012年3月)

東野 慎平 (SHMPEI HIGASHINO)  
在学期間 (2011年4月 ~ 2013年3月)