

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22246057

研究課題名(和文) 先進安全機能を有する電気自動車の航続距離延長制御システムの研究

研究課題名(英文) Range extension control system of electric vehicle with advanced safety function

研究代表者

藤本 博志 (Fujimoto, Hiroshi)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：20313033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,200,000円、(間接経費) 10,860,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数の駆動用及び操舵用のモータを最適に制御することにより、電気自動車(EV)の一充電走行距離を飛躍的に伸ばすことを可能とする制御システムを開発した。さらに代表者がこれまでに開発したモータの高制御性を利用した運動制御技術を組み合わせ、安全で高効率なEVシステムを開発した。その最適な駆動方式を学術的に明らかにするために、同一車両で様々な駆動方式を公平に比較を行うことが可能な「サブユニット方式」を有する世界唯一のEVを試作した。

さらに、インホイールモータや車載モータなど機構の異なるサブユニットを複数製作し、それぞれの構成に応じた、先進安全制御技術や航続距離延長制御システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：Electric vehicles (EVs) have attracted considerable interest as zero-emission vehicles. Moreover, because motors are more compact than internal-combustion engines, the drive system used in EVs may be implemented in a variety of compositions. However, there has been no research to compare the performances of different types of EV drive systems under identical conditions. Thus, to compare the various drive systems for EVs, we developed an experimental vehicle named FPEV4-Sawyer. The drive system of this vehicle can be changed---e.g., from one using an on-board motor to one based on in-wheel motors, and vice versa---by using a variable unit system. We also developed novel advanced safety control and range extension control for each drive system.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御システム 電気自動車 モータ制御 車両運動制御 モーションコントロール パワーエレクトロニクス

### 1. 研究開始当初の背景

近年、温室効果ガスによる地球温暖化や大気汚染といった環境問題、化石燃料枯渇問題やエネルギー問題が深刻化し、社会は低炭素化を求められている。そこで、走行中には一切 CO<sub>2</sub> を排出せず、発電時を含めてもガソリン車と比べて排出量を大幅に低減するとされている電気自動車あるいは、プラグインハイブリッド自動車の普及が期待され、また実際に各社から発売され始めている。しかしながら、市販が始まったばかりの電気自動車は1台の大きなエンジンを1台の車載モータに置き換えたものにすぎず、またその短い航続距離が普及に対する大きな妨げとなっていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、複数の駆動用及び操舵用のモータを最適に制御することにより、電気自動車(EV)の一充電走行距離を飛躍的に伸ばすことを可能とする航続距離延長制御システム(Range Extension Control System: RECS)を開発する。さらに代表者がこれまでに開発してきた、モータの高制御性を利用した運動制御技術と有機的に組み合わせ、安全で高効率なEVを開発する。その最適な駆動方式を学術的に明らかにするために、同一車両で様々な駆動方式を公平に比較を行うことが可能な「サブユニット方式」を有する世界唯一の可変駆動ユニット型EVを試作する。CO<sub>2</sub> と車両の不安定性に起因する交通事故を抜本的に減らす制御技術の開発を最終目標とする。

### 3. 研究の方法

#### (1)可変駆動ユニットシステム型EVの開発

代表者らのグループでは、これまでインホイールモータ(In-Wheel Motor: IWM)を搭載したEVで車両姿勢制御や制駆動力制御に関する研究に取り組んできた。一般的にIWM搭載車両は、ドライブシャフトのねじれ共振などの問題を持った車載モータ(On-Board Motor: OBM)搭載車両に比べ、優れた制御性能を持つと言われている。一方、高価格である点や市販車での実績が少ないため、今後も当面の間はOBMとディファレンシャルギヤを用いた駆動方式の車両が主流となると考えられる。そこで本研究ではEVの駆動システムの構成について検討するために、可変駆動方式EV、FPEV4-Sawyerを開発した。この車両の最大の特徴は、駆動用モータを搭載したサブユニットを、別のサブユニットと交換可能な点である。この機構により同一の車両で、OBMやIWMなどのEV駆動方式構成について安全性や航続距離延長制御の観点から、公平な比較が行える。またOBMの低い制御性能を、できるだけ理想的なIWMに近づけるため、シャフトねじれ共振抑制制御系を開発した。

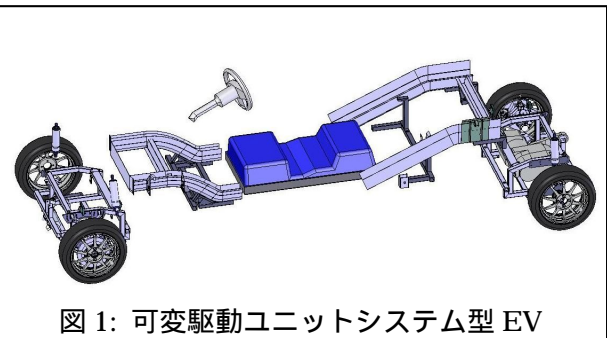
#### (2)航続距離延長制御系の開発

複数の効率特性の異なるモータを有するEVに対して、加速(登坂)・減速(降坂)・一定速走行時において、最適に制駆動力を配分する制御法を開発した。また、左右駆動力差によりヨーモーメントを発生することにより、操舵角を減少させ、コーナリング抵抗を最小化する制御法を開発した。これらに先進安全制御機能を付加し、実験により性能の評価を行った。

### 4. 研究成果

#### (1-1)可変駆動ユニット型EVの試作

図1,2に試作した実験車両、FPEV4-Sawyerを示す。この車両は可変駆動ユニットシステムを有しており、駆動用モータやステアリング機構が組み込まれたサブユニットを取り外し、異なるサブユニットと交換できる。



可変駆動ユニットシステムとは、バッテリーやコントローラ、インバータを搭載したメインユニットとモータやステアリング機構が組み込まれた前後輪サブユニットが分割可能となっている構造である。

各サブユニットはモータなどの駆動機構以外は基本フレーム、サスペンション構造、ステアリング機構は共通である。したがって、前後サブユニットを交換可能であり、車両駆動方式の自由な変更が行える。

サブユニットは、駆動用モータが搭載されていない非駆動輪ユニット、1つの車載モータを搭載し、ディファレンシャルギヤで左右に駆動力を分配する方式の車載モータユニット、インホイールモータユニット、2つの車載モータを搭載し左右独立駆動が行える左右輪独立駆動車載モータユニットなどを開発している。

#### (1-2)ドライブシャフト共振抑制駆動力制御

市販電気車にみられる1つの車載モータとディファレンシャルギヤにより左右輪を駆

動する機構では、ドライブシャフトの共振により、EVの最大の長所であるモータの応答性の良さを活かすことができない。そこで本研究では、この機構の数学モデルを導出し、その共振周波数が、車輪のスリップ率により大きく変動することを突き止めた。そこで、図3に示すように、スリップ率に応じて制御器をリアルタイムでチューニングすることにより、路面状態にロバストなスリップ率制御系を構成した。その実験結果を図4に示す。非制御時では大きな振動を励起しているが、提案制御法により、これが抑圧できていることが確認できる。その制御性能は1WM車には及ばないが、OBM車でも工夫次第では先進安全機能を付加させることが可能であることを示した。

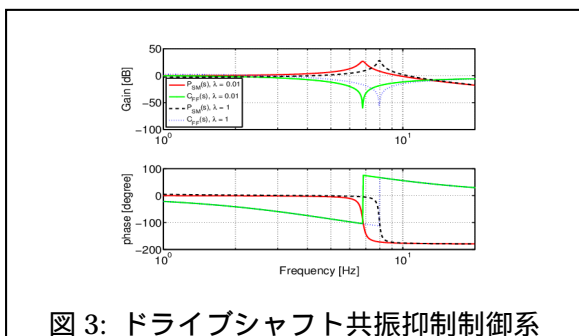


図3: ドライブシャフト共振抑制制御系

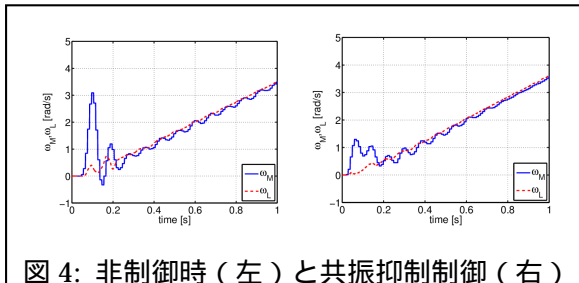


図4: 非制御時(左)と共振抑制制御(右)

## (2) 航続距離延長制御系(RECS)の成果

本研究では、航続距離を延長するために4輪駆動力配分法や、最適前後輪操舵、最適速度指令生成、最適姿勢計画、最適モータギア比設計など、様々な研究を行った。また航続距離と安全性を両立させる高度な制御系も開発した。紙面の都合上、本稿では4輪インホイールモータ車に対する最適駆動力・横力配分による成果のみを示す。

### (2-1) 最適前後輪配分による直進時のRECS

前後輪のモータの効率特性を改めて異なったものを搭載し、この違いを利用して航続距離の延長を行った。まずベンチ試験を行い、速度・トルク特性マップ上で前後輪のモータの効率特性を精密に計測した。この特性から、モータの銅損と鉄損の数学モデルとパラメータを得た。さらに、実走行試験を行い、走行抵抗モデルと、荷重移動とスリップ率を考慮したタイヤの駆動力モデルを得た。これらの数学モデルから、車体速と必要総駆動力(または加速度)が与えられた時に、エネルギー損失を最小にする前後輪配分制御則を

導出した。

図5に実験で採用した車体速度パターンと、開発した理論で導出した最適配分比を示す。加減速に応じて、前後輪配分比が変化していることが分かる。この時の消費エネルギーを図6に示す。実走行試験において、従来の前後輪均等配分( $k=0.5$ )に比べて、最適配分制御では、約8%エネルギー消費が削減できていることが分かる。

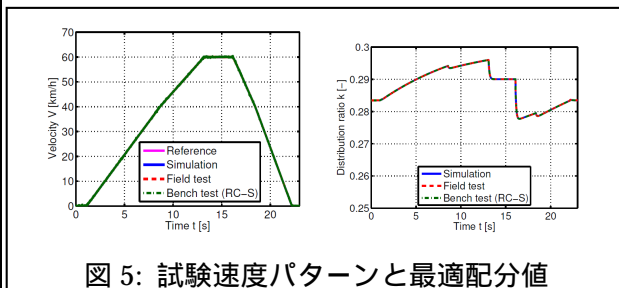


図5: 試験速度パターンと最適配分値

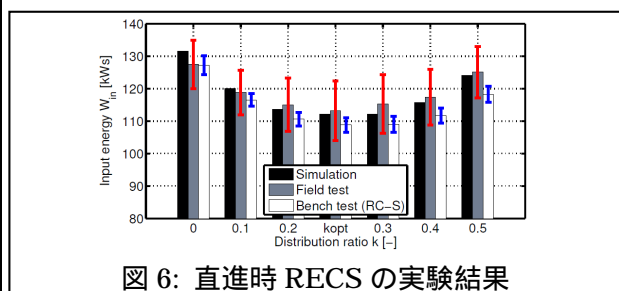


図6: 直進時RECSの実験結果

### (2-2) 旋回時の先進安全RECS

次に旋回時において、左右の駆動力配分と前後輪のアクティブステアリングを用いた航続距離延長制御の成果を示す。図7に示すように、左右の駆動力差を与えれば、より小さい操舵角度でコーナを旋回でき、コーナリング抵抗を減少させることができる。ところが荷重が抜けた旋回内輪に大きな制動力を与えるとタイヤが発生できる力が物理的限界に達し、車両姿勢が不安定になる。そこでアクティブ操舵を用いた先進安全制御を導入した。

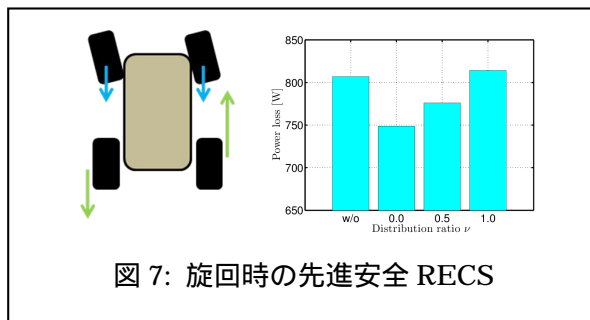


図7: 旋回時の先進安全RECS

図7右において、非制御時(w/o)に比べて、航続距離を重視した通常モード(重み  $=0$ )では、同じコースを同速度で走行しているのにも関わらず、消費エネルギーが減少し航続距離が1.7km/kwh増加した。さらに、低 $\mu$ 路に入った緊急モード( $=1$ )では、最大負荷率を1割改善できている。このようにして、条件に応じて、安全性を確保したままで、航続

距離を延長することに成功した。

## 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)

[雑誌論文](計21件)\*全て査読有

原田信吾, 藤本博志: 電気自動車におけるスリップ率とモータ損失を考慮した前後輪制駆動力配分による加減速時の航続距離延長制御, 電気学会論文誌 D, Vol. 134, No. 3, pp. 268-275, (2014)

Yafei Wang, Binh Minh Nguyen, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori: Multi-rate Estimation and Control of Body Slip Angle for Electric Vehicles based on on-board vision system, IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEE, Vol.61, pp. 1133-1143, (2014)  
K.Nam, H.Fujimoto and Y.Hori: Advanced Motion Control of Electric Vehicles Based on Robust Lateral Tire Force Control via Active Front Steering, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, IEEE, Vol.19, pp. 289-299, (2014)

Takayuki Miyajima, Hiroshi Fujimoto, Masami Fujitsuna: A Precise Model-based Design of Voltage Phase Controller for IPMSM, IEEE Transactions on Power Electronics, IEEE, Vol.28, pp. 5655-5664, (2013)  
DOI : 10.1109/TPEL.2013.2259262

Kenta Maeda, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori, "Four-wheel Driving-force Distribution Method for Instantaneous or Split Slippery Roads for Electric Vehicle", Automatika, vol.54, no. 1, pp.103-113, (2013)

K. Nam, S. Oh, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Estimation of Sideslip and Roll Angles of Electric Vehicles Using Lateral Tire Force Sensors Through RLS and Kalman Filter Approaches", IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol.60, No.3, pp.988-1000, (2013)

K. Nam, S. Oh, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Robust yaw stability control for electric vehicles based on active front steering control through steer by wire system", International Journal of Automotive Technology, vol.13, no. 7, pp.1169-1176, (2012)

K. Nam, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Lateral Stability Control of In-wheel-motor-driven Electric Vehicles Based on Sideslip Angle Estimation Using Lateral Tire Force Sensors", IEEE Transaction on

Vehicular Technology, Vol.61, No.5, pp.1972-1985, (2012)

角谷勇人, 藤本博志, 前後輪横滑り角と左右トルク配分に基づく電気自動車の航続距離延長制御システム", 電気学会論文誌 D, vol.131, no. 3, pp.308-314, (2012)

吉村雅貴, 藤本博志, "インホイールモータを搭載した電気自動車の駆動トルク制御法", 電気学会論文誌 D, vol.131, no. 5, pp.721-728, (2011)

安藤直樹, 藤本博志, "電気自動車の後輪独立制駆動力配分とアクティブ前後輪操舵を用いたヨーレート制御", 電気学会論文誌 D, vol.131, no. 4, pp.616-623, (2011)

[学会発表](計48件)

Shingo Harada, Hiroshi Fujimoto: Range Extension Control System for Electric Vehicles Based on Optimal-Deceleration Trajectory and Front-Rear Driving-Braking Force Distribution Considering Maximization of Energy Regeneration, The 13th International Workshop on Advanced Motion Control, Yokohama, Japan, 2014.3.15.

Toshihiro Yone, Hiroshi Fujimoto: Proposal of a Range Extension Control System with Arbitrary Steering for In-Wheel Motor Electric Vehicle with Four Wheel Steering, The 13th International Workshop on Advanced Motion Control, Yokohama, Japan, 2014.3.15.

Shingo Harada, Hiroshi Fujimoto, Range Extension Control System for Electric Vehicles during Acceleration and Deceleration Based on Front and Rear Driving-Braking Force Distribution Considering Slip Ratio and Motor Loss, 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 2013.11.13.

Hiroshi Fujimoto, Kenta Maeda: Optimal Yaw-Rate Control for Electric Vehicles with Active Front-Rear Steering and Four-Wheel Driving-Braking Force Distribution, 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 2013.11.12.

Hiroshi Fujimoto, Sho Egami, Jun Saito and Kazuaki Handa, "Range Extension Control System for Electric Vehicle Based on Searching Algorithm of Optimal Front and Rear Driving Force Distribution", 38th Annual Conference of the IEEE Industrial

Electronics Society, Montreal, Canada, pp.4244-4249, 2012.10.26.

Hiroshi Fujimoto, Junya Amada, Kenta Maeda, "Review of Traction and Braking Control for Electric Vehicle", The 8th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Seoul, Korea, pp.1292-1299, 2012.10.12.

Hiroshi Fujimoto, Hayato Sumiya, "Advanced Safety Range Extension Control System with Front and Rear-active Steering and Left and Right-force Distribution", The 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Taiwan, pp.532-537, 2012.7.13.

Sho Egami and Hiroshi Fujimoto, "Range Extension Control System for Electric Vehicles Based on Front and Rear Driving Force Distribution Considering Load Transfer", 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2011, Melbourne, Australia, pp.3721-3726, 2011.11.10.

Hiroshi Fujimoto and Hayato Sumiya, "Range Extension Control System of Electric Vehicle Based on Optimal Torque Distribution and Cornering Resistance Minimization", 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2011, Melbourne, Australia, pp.3727-3732, 2011.11.9.

Hiroshi Fujimoto "Regenerative Brake and Slip Angle Control of Electric Vehicle with In-wheel Motor and Active Front Steering", 1st International Electric Vehicle Technology Conference, Yokohama, Japan, No.20117205, pp.1-6(6pages paper), 2011.5.17.

Hayato Sumiya and Hiroshi Fujimoto, "Distribution Method of Front/Rear Wheel Side-Slip Angles and Left/Right Motor Torques for Range Extension Control System of Electric Vehicle on Curving Road", 1st International Electric Vehicle Technology Conference, Yokohama, Japan, No.20117208, (6 pages paper), 2011.5.17.

Hayato Sumiya and Hiroshi Fujimoto, "Range Extension Control System for Electric Vehicle with Active Front Steering and Driving/Braking Force Distribution on Curving Road", 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Arizona, pp.2346-2351, 2010.11.9.

Hiroshi Fujimoto and Yuya Yamauchi, "Advanced Motion Control of Electric Vehicle Based on Lateral Force Observer with Active Steering", IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2010 Proceedings, Bari, Italy, pp.3627-3632, 2010.7.6.

Hiroshi Fujimoto and Shinsuke Sato, "Pitching Control Method Based on Quick Torque Response for Electric Vehicle", The 2010 International Power Electronics Conference -ECCE ASIA- IPEC-Sapporo 2010 PROCEEDINGS, Sapporo, Japan, pp.801-806, 2010.6.22.

〔図書〕(計3件)

藤本博志他(電気学会編), オーム社, 電気工学ハンドブック第7版, 第2章第3節:「車体の運動制御」執筆担当, 2013  
Hiroshi Fujimoto(Edited by T. Ymaguchi, M. Hirata and J. Pan), CRC PRESS, "High speed precision Motion Control" Chapter4-4:"Repetitive Control" Chapter5-2:"Perfect Tracking Control", 2012

堀洋一・藤本博志他, 自動車技術会, 自動車技術ハンドブック EV・ハイブリッド編, 第7章第2節:「モーションコントロール(制御)」p.290-295 執筆担当, 2011

〔産業財産権〕

出願状況(計4件)

名称: モータ制御装置

発明者: 藤本博志、兼松正人、榎本俊夫、吉本貴太郎、宮川隆行

権利者: 東京大学、日産自動車

種類: 特許

番号: 特願 2012-208362

出願年月日: 2012.9.21

国内外の別: 国内

取得状況(計8件)

名称: Slip ratio Estimating Device and Slip Ratio Control Device (スリップ率推定装置およびスリップ率制御装置)

発明者: 藤本博志、藤井淳

権利者: 横浜国立大学

種類: 特許

番号: US8170768B2

取得年月日: 2012.5.1

国内外の別: 米国

〔その他〕

ホームページ

<http://hflab.k.u-tokyo.ac.jp/fujimoto/index-j.html>

(1)研究代表者

藤本 博志 (Hiroshi, Fujimoto)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・  
准教授  
研究者番号：20313033

(2)研究分担者

堀 洋一 (Yoichi, Hori)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・  
教授  
研究者番号：50165578

河村 篤男 (Atsuo, Kawamura)  
横浜国立大学・工学研究科 ( 研究院 ) ・  
教授  
研究者番号：80186139  
( H22-24 まで )