

機関番号：12601
 研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2008 ～ 2010
 課題番号：20246050
 研究課題名（和文） 電気自動車の革新的運動制御およびエネルギーストレージシステムに関する総合的研究
 研究課題名（英文） Integrated Research on Innovative Motion Control and Energy Storage System of Electric Vehicles
 研究代表者
 堀 洋一（HORI YOICHI）
 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

研究成果の概要（和文）：

本研究は「電気自動車の革新的運動制御およびエネルギーストレージシステムに関する総合的研究」と題し、電気駆動によって初めて実現できる新しい制御機能を10程度にしぼり、大きく2項目10課題に分けて3年計画でこれを追求したもので、大きな成果を上げることができた。2項目の題目をあげておく。

1. 電気モータの高い制御性を生かした自動車のモーション制御技術
2. キャパシタを用いた移動体エネルギーストレージ・供給技術

研究成果の概要（英文）：

This research aimed to the novel control strategy which can be realized only by electric drive. About ten sub-titled researches under "Integrated Research on Innovative Motion Control and Energy Storage System of Electric Vehicles " were established and divided them into two groups and 10 subjects, and pursued their effectiveness in three years. The titles of the two groups are as follows:

1. Motion control technologies of vehicles which utilize advanced control characteristics of electric motor
2. Energy storage and supply technology to moving objects using the capacitor

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	16,600,000	4,980,000	21,580,000
2009年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2010年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
年度			
年度			
総計	33,600,000	10,080,000	43,680,000

研究代表者の専門分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード： (1)電気自動車 (2)モーション制御 (3)スリップ抑制制御
 (4)ステアリング制御 (5)エネルギー効率化 (6)スーパーキャパシタ
 (7)自動変速機 (8)ワイヤレス給電

1. 研究開始当初の背景

当時、電気自動車専門の国際会議 (EVS) はすでに 22 回を数え、第 22 回は昨年 10 月に横浜で開催され、研究代表者はプログラム委員長を務めた。ハイブリッド車は 2 つのシステムをもつため小型車には向かず、燃料電池車の実現はかなりの未来になることがはっきりしてきた。ガソリン車がハイブリッド化され、プラグインハイブリッドを経て純粋な電気自動車に至るといったシナリオが現実味を帯びてきた。

三菱自動車と富士重工は MIEV と R1e を発表し、東京電力が大量導入を発表して注目を集めている。しかし、これらはエネルギー効率などの面で優れた性能をもち社会的にも意義あるプロジェクトである一方、いまだ制御面での優位性を生かしきっていないと言いたい。

電気駆動を自動車に生かす技術については、自動車技術会、電気学会、日本機械学会、電気自動車研究会などに研究活動があり、海外では、IEEE、EPE などにおいてパワーエレクトロニクスやモータ制御をベースとした研究発表がある。また、自動車そのものの運動制御は、AVEC などの日本発の国際会議でかなり議論されているが、電気自動車の制御面での特長を生かした技術の適用はまだ遠い将来のテーマであるという認識が強い。

このような中で、研究代表者らの初期の研究は世に認められ、2000 年には「第 14 回先端技術学生論文」において文部大臣賞（最優秀賞）を受賞した。その後も研究代表者らの研究への注目度は非常に高く、内外での招待講演もかなりの数にのぼっている。

とくに、研究代表者が一連の研究をまとめた "Future Vehicle driven by Electricity and Control -Research on 4 Wheel Motored 'UOT March II'-", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.51, No.5, pp.954-962, 2004 は高い評価を受けており、続く電気自動車の研究論文においてよく引用されている。

一方、キャパシタ (EDLC) 研究の歴史は長く、我が国での研究開発が抜きん出ている。2004 年 10 月の日本電子のナノゲートキャパシタの発表によってにわかに注目を集めるようになったが、大形化はそれほど容易ではない。しかし多くの技術者がきわめて将来性の高い技術であると見ており、研究開発にしのぎを削っている。

先日開催された CEATEC Japan 2007 においては、キャパシタの展示が多く見られ、近年の性能改善にも著しいものがある。また、上海のキャパシタバスやダイハツミラのアイドリングストップ車など、かなりの規模での実用例も見られるようになってきた。さら

に、ACT の Premlis や富士重工、太陽誘電などのリチウムイオンキャパシタという中間的なデバイスも出現している。

キャパシタは、研究代表者自身が名付けたように「エネルギーと知恵の缶詰」である。周辺の電子回路の研究が重要で、電池との組み合わせに必要となる回路技術の開発は学術的意義も大きい。本研究は、キャパシタだけで動く車を製作し制御実験に供するもので、他には類を見ない話題性のある試みである。

さらに、永久磁石モータを使い続けると、ネオジムやディスプロジウムレアメタルパニックが懸念される。磁石に頼らない制御法の開発なども重要テーマである。広い視野で将来の車社会を考えて行く必要がある。

電気自動車の大きな欠点である蓄電装置のエネルギー密度の限界を考えると非接触充電は重要な要素となる。昭和飛行機、早稲田大学、三菱重工などでの開発が知られているが、宇宙科学研究所出身の学生を担当させ、近傍電磁界の新たな応用として大電力の伝送とアンテナ間距離や位置合わせの冗長性をもつ充電機構を開発し、共通技術を探らなければならない。

電気自動車の分野において世界のイニシアティブをとる重要性は論を待たない。もの作りの楽しみを供給し、大学においてこの分野の研究拠点を作っていくことは、健全な若い技術者を育てる意味でもきわめて重要であると考えた。

2. 研究の目的

本研究は「電気自動車の革新的運動制御およびエネルギーストレージシステムに関する総合的研究」と題し、電気駆動によって初めて実現できる新しい制御機能を 10 程度にしばり、大きく 2 項目に分けて 3 年計画でこれを追求したものである。

研究の遂行は大学院生を中心とし、自動車関連会社等からは独立性の高い研究チームで行う。適切な情報交換や協力関係は保ちつつも、特定の企業との連携にしばられず、また目先の利益に惑わされない長期的でアカデミックな研究を行い、電気自動車が実現する新しい技術の指針を示すことを目的とした。

1. 電気モータの高い制御性を生かした自動車のモーション制御技術

電気モータには研究代表者がかねてから主張してきた、次の 3 つの特長がある。

① **トルクの応答速度が非常に速い**。ミリ秒オーダーのトルク応答速度は、エンジンと比べ

て2ケタ、油圧ブレーキと比べても1ケタ以上高速である。高速トルク応答は強いフィードバック制御を可能にし、タイヤのスリップを防止する高性能 ABS やトラクション制御を可能にする。駆動と制動を継ぎ目なく行えるため、きわめてなめらかでショックの少ない制動が実現できる。

②出力トルクを正確に把握することができる。 エンジンや油圧ブレーキの発生トルクを正確に知ることは容易でないが、モータ駆動では電流を観測すればたやすい。タイヤから路面に伝わる制駆動力は、提案の駆動力オブザーバによって正確に推定され、路面摩擦係数などの路面状態を実時間で推定することができる。

③モータは小型化が可能であり各輪に分散配置できる。 左右輪の駆動力差やヨーモーメント力を直接発生させ、すべりやすい路面上での走行安定性改善など、高性能な車両運動制御が可能になる。

これらを生かして、本項目では下記の5つの研究を行う。括弧内は担当する大学院生の名前である。

- (1) モータのトルク垂下特性を生かしたスリップ抑制制御 (佐竹)
- (2) 動的重心位置推定を利用したトラクション制御 (河島)
- (3) 車体横すべり角推定にもとづく車両運動安定化制御 (耿)
- (4) DYC と AFS を組み合わせ EPS を用いた安定旋回制御 (皆木)
- (5) リアルタイム速度パターン生成を用いた操作性の向上 (殷)

2. キャパシタを用いた移動体エネルギー・供給技術

近未来、電池に替わる可能性や電池との併用が盛んに議論され、実用例も多々見られるようになってきた電気二重層キャパシタには、次の4つの特長がある。

- ①寿命が長い。** 化学変化を伴わないので寿命は半永久的で交換が不要になる。
- ②大電流での充放電が可能。** とくに電池に比較して充電が格段に早いため、エネルギーをもらいながら走る自動車というパラダイムシフトがおこり、頻繁に充電しながら走る電車のような車という未来が見えてくる。
- ③重金属を用いないため環境にやさしい材料のみで作られる。**
- ④端子電圧から残存エネルギーが正確にわかる。** 端子電圧が変わることは欠点ではなく、信頼性のあるエネルギー貯蔵デバイスという特長として、逆に利用することができる。

このキャパシタの特長を生かし、下記の5つの研究を行う。括弧内は担当する教員もしくは大学院生の名前である。

- (6) キャパシタ駆動小型 EV による新しいラ

イフスタイルに関する考察 (堀)

- (7) PHEV における電池とキャパシタの組み合わせ法に関する研究 (小林)
- (8) キャパシタと高性能 DD インホイールモータによる高速回生制御 (岡部)
- (9) キャパシタの充放電特性を生かした AMT に関する研究 (藤井)
- (10) 電磁気を利用した移動体への非接触充電に関する研究 (居村)

研究代表者は、以上2つの大項目、すなわち、モーション制御 と キャパシタ利用こそが、将来の電気自動車、ひいては自動車や交通システムの未来を握るキーテクノロジーであると信じている。実用的にはまだまだ先の話であっても、いま大学レベルでやっておかなければならない項目は非常に多い。それにわずかでも貢献したいと考えた。

本研究の学術上の最大の特徴は、とかく環境面の優位性のみが主張されがちな電気自動車の特長を、電気モータの制御性に求めているところにある。しかも単なる「モータへの置き換え」ではない「電気駆動によって初めて可能になる電気自動車ならではのモーション制御」の可能性を主張し、これを研究の核心にすえていることである。電気モータの最大の特長は速いトルク応答と、発生トルクが正確に把握できることにある。また各輪への分散配置ができることである。しかしこの点は従来ほとんど認識されていない。

いま世間の未来車の話は、エネルギー問題や二酸化炭素問題を念頭においた効率面の議論や、ハイブリッド車や燃料電池車の戦略的な開発動向にある。しかし、いつまでも定常的な速度・トルク特性や、効率のマップで議論していたのでは電気自動車には勝ち目はない。

電気自動車の真の優位性は、電気モータの基礎的な性質にある。純電気自動車のみならず、燃料電池車もハイブリッド車も、電気モータを主たる駆動源とする車は、トルクの応答性という時間軸を持ち込むことによってたちまち優位に立つ。この点において電気制御が大きな役割を果たすことを実証したい。

乗り物は水平移動であるから原理的に必要なエネルギーはきわめて少ない。車のエネルギーロスの大半はタイヤの摩擦が原因である。鉄道のエネルギー効率が格段によいのは、摩擦のロスのきわめて少ない鉄車輪と鉄レールを使うためである。しかしこの組み合わせはよくすべるから、粘着制御が不可欠で新幹線などはそうして走っている。電気制御の違いが機械特性に大きな影響を及ぼすという興味深い学術的事実がある。その原理を直接応用し、等身大の世界にその効果を見る興味深い研究であると自負している。

本研究は、電気モータがもつ制御面の本質的かつ基礎的な優位性に着目し、本格的に取り組む独創性の高い研究である。本研究の成果が広く用いられるようになれば、スリップ等の危険性が格段に少なくなることはもちろん、すべりやすい路面でも高度な姿勢制御によって自動車運転の安全性向上に大いに貢献できる。また、より損失の少ないタイヤを用いることによって、電気自動車の大きな問題であるエネルギー効率を飛躍的に向上できると考えられ、ひと味もふた味も違った面から地球環境問題への大きな貢献が期待できると考えられる。

また、この研究過程を通じて、大学における電気自動車制御の研究拠点を作り、広く電気技術者を育てる受け皿となす。あまり費用をかけなくても、電気自動車の制御という魅力的なテーマの実験が可能であることを示す。多くの大学の電気工学関係者に参入を呼びかけ、昨今人気凋落の著しい電気系復活に貢献することも重要な目的である。

3. 研究の方法

1. 電気モータの高い制御性を生かした自動車のモーション制御技術

(1)トルク垂下特性を生かしたスリップ抑制制御

IPMSM 駆動モータでトルク垂下特性を生かした電流制御系によってスリップ時のモータ速度の増加を抑制する手法と調整法を提案し、dq 両軸電流制御系に拡張適用した。また、さまざまな手法を統一的に含む Maximum Transmissible Torque Estimation (MTTE) にもとづくスリップ抑制法を提案し、COMS3 を改造した実車や新しく加わった Kanon などを用いた走行実験によってもその優秀性を実証した。

(2)動的重心位置推定を利用したトラクション制御

この項目については、バンク角の推定を含むロール安定性改善制御について、深い考察と実機実験による検証を行った。

(3)車体横すべり角推定にもとづく車両運動

安定化制御についてはとくに新たな知見はないが、今後への考察をかなり深めることができた。

(4)DYC と AFS を組み合わせ EPS を用いた安定旋回制御

AFS 実現上での問題点を実験的に明らかにした。路面反力を運転者へ伝達しつつ AFS からの操舵干渉低減を同時に実現するため、

2つの手法（可変アシスト比・規範モデル混合制御、路面反力推定に基づく操舵反力制御）を提案し効果を確認した。さらに、とくに人間の感度特性の取り扱いについている検討しており、今後の進展が期待される。

(5)リアルタイム速度パターン生成を用いた操作性の向上については、最終年度にはとくに進展はなかったが、今後さらに掘り下げたいと考えている。

2. キャパシタを用いた移動体エネルギーストレージ・供給技術

(1)キャパシタ駆動小型 EV による新しいライフスタイルに関する考察

さまざまな機会において、モータ/キャパシタ/ワイヤレスによって未来の車社会を描こうという啓蒙を行っており、聴衆の賛同も得られている。

(2) PHEV における電池とキャパシタの組み合わせ法に関する研究

小規模の実験回路を製作し両者の組み合わせに関する基礎研究を継続中で、修士論文研究として大電力実験にも成功した。

(3)キャパシタと高性能 DD インホイールモータによる高速回生制御

文字通りに特化した研究の進展はとくになかったが、(3)との組み合わせで新計画を立てている。

(4)キャパシタの充放電特性を生かした AMT に関する研究

モータアシスト AMT を提案し、その成立性と制御方法に関する研究は終了して昨年の博士論文となった。駆動力制御と同時に車速に応じたキャパシタの充放電制御の両立が必要である。エンジントルクオブザーバを用いた、いかにも電気工学者らしい新しい制御手法を提案し、オートリクショーを改造したハイブリッド車を製作してその有効性を示した。この研究はこれで一段落である。

(5)磁気共鳴を利用した移動体への非接触充電に関する研究

EV へのワイヤレス充電アンテナの検討を詳細に行い、とくに磁気共鳴方式に関して等価回路を用いた見通しの良い設計法を確立し、博士論文として完成させ、その研究者を助教として今年度採用した。きわめて高効率であること、大ギャップ、位置ずれに強いことなどを示し、将来、走行中の EV へのワイヤレス給電が十分見通せることを実証した。インピーダンス整合法などの新しい知見も得られつつあり、今後の大発展が期待される。

4. 研究成果

最後に、研究成果として、社会・国民に発信する方法に重点をおいて述べておく。

本研究を開始したとき研究代表者が所属した東京大学生産技術研究所は、記者会見、新聞やTV発表、さらにキャンパス公開など、社会や国民に向けた情報発信に熱心で、研究代表者は生研の広報委員長を務めていたのでその先鋒でもある。

現在の所属の新領域創成科学研究科でも、さらに激しく一般への研究成果公開を行っており、諸種のイベントを催したり、実機のデモを行ったりしている。自動車技術会内には、ワイヤレス給電に関する技術部門委員会を設立し、40名近いメンバーを集めて盛んに活動を行っている。

研究代表者は、NEDOのエネルギー使用合理化技術戦略的開発における電動車両系技術委員会委員長、JMAモータ技術シンポジウム委員長、キャパシタフォーラム（キャパシタ関連企業の集合体）会長、電気学会産業応用部門部門長を歴任し、その傘下の自動車技術委員会委員などの立場にある。自動車技術会では、技術担当の理事を務めている。

JARIの主催で開催されたEVS22（横浜）ではプログラム委員長をつとめ、世界初の電気自動車に関する論文誌WEVA Journalを創刊した。これらの立場を通じた社会への情報発信が可能である。大学においては、制御工学（学部および大学院）、モーションコントロールなどの定常講義、人間社会と交通システムなどのオムニバス講義を通じて若い世代への情報発信を十分行うことができる。

本研究を遂行しているうちに、いくつかのハンドブックを編集委員長、あるいは幹事として編纂する機会にも恵まれて、本研究の成果はそれらの中にも、いち早く取り込まれている。

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）

〔雑誌論文〕（計21件）

① Jia-Sheng Hu, Dejun Yin, and Yoichi Hori, Fault-tolerant Traction Control of Electric Vehicles, 査読有, IFAC Journal of Control Engineering Practice (CEP), Vol.19, 2010, pp.204-213

② 居村岳広, 堀 洋一, 等価回路から見た磁界共振結合におけるワイヤレス電力伝送距離と効率の限界値に関する研究, 査読有, 電気学会論文誌D, Vol.130, 2010, pp.1169-1174

③ Jia-Sheng Hu, Mi-Ching Tsai, Feng-Rung Hu, and Yoichi Hori, Robust Control for Coaxial Two-Wheeled Electric Vehicle, 査読有, Journal of Marine Science and Technology, Vol.18-2, 2010, pp.172-180

④ 河島清貴, 内田利之, 堀 洋一, ロールオーバー指標を用いたインホイールモータ搭載電気自動車におけるロール安定化制御, 査読有, 電気学会論文誌D, Vol.130, 2010, pp.655-662

⑤ 佐竹正光, 河島清貴, 内田利之, 堀 洋一, IPMSM 駆動電気自動車のトルク垂下特性改善によるスリップ抑制制御 - dq 軸電流制御系への拡張と実車実験による検証 -, 査読有, 電気学会論文誌D, Vol.130, 2010, pp.430-435

⑥ 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀 洋一, 等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究 -共振時の電磁界結合を利用したワイヤレス電力伝送-, 査読有, 電気学会論文誌D, Vol.130, 2010, pp.84-92

⑦ 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀 洋一, 共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力伝送 -磁界型アンテナと電界型アンテナ-, 査読有, 電気学会論文誌D, Vol.130, 2010, pp.76-83

⑧ 居村岳広, 堀 洋一, 電磁界共振結合によるエネルギー伝送 (特集:ワイヤレス・エネルギー伝送技術), 電気学会誌, 査読有, Vol.129, 2009, pp.414-417

⑨ Lotfi Mostefai, Mouloud, Denai and Yoichi Hori, Optimal Control Design For Robust Fuzzy Friction Compensator in a Robot Joint, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 査読有, Vol.56, 2009, pp.3832-3839

⑩ Dejun Yin, Sehoon Oh and Yoichi Hori, A Novel Traction Control for EV Based on Maximum Transmissible Torque Estimation, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 査読有, Vol.56, 2009, pp.2086-2094

⑪ Cong Geng, Lotfi Mostefai and Yoichi Hori, Direct Yaw Moment Control Evaluation of an In-Wheel-Motored Electric Vehicle Based on Body Slip Angle Fuzzy Observer, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 査読有, Vol.56, 2009, pp.1411-1419

⑫ Yoichi Hori, Motion Control of Electric

Vehicle and Prospects of Super-capacitors, IEE Japan Transactions on Electrical and Electronic Engineering, "Special issue on Motion Control in Japan", 査読有, Vol.4, 2009, pp.231-239

〔学会発表〕 (計 96 件)

① Binh Minh Nguyen, Kanghyun Nam, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori and Cao Minh Ta, Modeling of Lateral Dynamics for Motion Control of Electric Vehicle, SEATUC SYMPOSIUM 2011 (South East Asian Technical Universities Consortium), 2011.2.24, Hanoi, Vietnam

② Tech Chan Beh, Masaki Kato, Takehiro Imura and Yoichi Hori, Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonant Coupling at Fixed Resonance Frequency- Power Transfer System Based on Impedance Matching -, EVS 25 (25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition), 2010.11.5, Shenzhen, China

③ Yoichi Hori, Application of Electric Motor, Super-capacitors, and Wireless Power Transfer to Enhance Operation of Future Vehicles (invited), KSAE Summer Symposium of HEV&FCV, 2010.9.9, Seoul, Korea

④ Kanghyun Nam, Sehoon Oh and Yoichi Hori, Robust Yaw Stability Control for Electric Vehicles Based on Active Steering Control, IEEE VPPC2010, 2010.9.1, Lille, France

⑤ Takehiro Imura, Hiroyuki Okabe, Toshiyuki Uchida and Yoichi Hori, Study on Open and Short End Helical Antennas with Capacitor in Series of Wireless Power Transfer using Magnetic Resonant Couplings, IEEE IECON 2009 (IES Annual Conference), 2009.11.3, Porto, Portugal

⑥ Ryo Minaki, Hiroshi Hoshino and Yoichi Hori, Ergonomic Verification of Reactive Torque Control Based on Driver's Sensitivity Characteristics for Active Front Steering, IEEE VPPC 2009, 2009.9.7, Dearborn, USA

⑦ Takeshi Fujii and Yoichi Hori, Motor- Assisted AMT System driven by Supercapacitors and Disturbance Observer-based Controller, EVS24 (The International Battery Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium), 2009.5.13, Stavanger, Norway

⑧ Kiyotaka Kawashima, Toshiyuki Uchida and

Yoichi Hori, Rolling Stability Control Based on Electronic Stability Program for In-wheel-motor Electric Vehicle, EVS24 (The International Battery Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium), 2009.5.13, Stavanger, Norway

⑨ Cong Geng, Lotfi Mostefai, and Yoichi Hori, Body Slip Angle Observer for Electric Vehicle Stability Control Based on Empirical Tire Model with Fuzzy Logic Approach, IEEE IECON 2008, 2008.11.11, Orlando, USA

⑩ Giuseppe Guidi, Tore M. , Undeland, Yoichi Hori, Optimized Power Electronics Interface for Auxiliary Power Buffer Based on Super-capacitors, VPPC 2008, 2008.9.5, Harbin, China

〔図書〕 (計 4 件)

① 堀 洋一 (監修), シーエムシー出版, 電気自動車のためのワイヤレス給電とインフラ構築, 2011, 全 314 ページ

② 堀 洋一 (編集委員長), 自動車技術会, 自動車技術ハンドブック 第 10 分冊 設計 (EV, ハイブリッド) 編, 2011, 全 438 ページ

③ 堀 洋一 (編集委員), オーム社, パワーエレクトロニクスハンドブック, 2010, 全 717 ページ

④ 堀 洋一 (編集委員), オーム社, 自動車の百科事典, 2009, 全 768 ページ

〔その他〕

ホームページ等

日本語 : <http://hflab.k.u-tokyo.ac.jp/ja/index.html>

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀 洋一 (HORI YOICHI)

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

以 上