

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	統計量に基づいた走行モード制御によるプラグインハイブリッド車の実時間燃費最適化
Title(English)	Statistics-based Drive Mode Control on Real-Time Fuel Economy Optimization in Plug-in Hybrid Electric Vehicles
著者(和文)	渡辺隆之助
Author(English)	Ryunosuke Watanabe
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11746号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:三平 満司,石崎 孝幸,倉林 大輔,早川 朋久,畑中 健志
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11746号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

# 論文要約

本論文では、ガソリンと電気の異なるエネルギー源で駆動するプラグインハイブリッド車（PHEV）の燃費最適化に取り組む。特に、事前に計画済みの走行経路上で取得された統計情報に基づいて、最適なエネルギー源切替をオンラインで行う手法を提案する。本論文は全7章から構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章「序論」では、はじめに本論文の研究背景として、複数のエネルギーによって駆動するシステムを研究することの重要性を述べる。そのようなシステムの代表例として長年研究されている PHEV を対象として、先行研究の結果、本研究の目的および貢献を具体的に述べる。

第2章「数学的準備」では、本論文にて必要となる数学的用語の定義や性質を紹介する。まず、凸集合の定義および凸最適化の用語を説明し、本論文で主に用いる最適化問題の定式化について説明する。また、不確定現象の数学的記述として確率変数・確率分布の定義および諸定理について述べ、確率変数の統計量から得られる不等式の性質を示す。最後に、確率分布を推定するために用いる Nadaraya-Watson カーネル回帰について述べる。

第3章「問題設定・モデル化」では、走行経路および PHEV のモデル化について述べる。まず、事前に計画された走行経路上で発生する負荷を統計情報に基づいてモデル化し、PHEV が走行する場の定義を行う。具体的には、走行経路を一定距離区間ごとに分割し、各走行区間ごとの道路勾配と車速を考える。本研究において、道路勾配は確定的、車速は確率的な値を持つものとする。PHEV のモデル化は、道路勾配・車速に対応してエネルギー消費量を与える静的マップとして表現する。本論文では、PHEV の選択可能な走行モードを EV モード・HV モードの2種類として定義し、それぞれの電気またはガソリンのエネルギー消費量マップを考える。

第4章「統計量に基づいた走行モード制御手法および実機検証」では、第3章で定義したモデルに対して、統計量に基づいた走行モード制御による PHEV の実時間燃費最適化手法を提案する。走行経路モデルおよび PHEV のエネルギー消費量マップを用いて、走行モード  $\{0, 1\}$  を決定変数とし、評価関数をガソリン消費量の期待値、バッテリーの充電残量に対する拘束条件も同様に期待値として設定する。この最適化問題は整数計画問題の一種である二値線形計画問題として定式化され、既存の効率的な数値最適化ソルバによって解くことができる。この提案手法の有用性を車両用の詳細シミュレーターを用いて検証する。さらに、提案手法の実機検証についても説明し、提案手法の最適化問題が実時間で実行可能であることを確認する。

第5章「リスクを考慮した燃費最適化」では、第4章で導入した手法の設計自由度を確保するために、走行モード入力の拡張およびリスク評価をするための統計量を導入する。その上で、評価関数・拘束条件でリスクを考慮した燃費最適化問題を定式化する。まず、走行モード入力の定義を拡張し、車速に応じてモードを決定するように

構成する。この拡張により、PHEV の内部システムは車速のフィードバックを受けて走行モードを制御できる。また、リスク統計量として conditional value at risk (CVaR) と entropic value at risk (EVaR) を用いる最適化を考える。CVaR はガソリン消費量が大きく発生するリスクを定量化することができ、エネルギー消費分布の正方向に対する裾の広がりを抑制する制御を可能にする。他方の EVaR は、バッテリーの充電残量に対する確率制約に Chernoff の不等式を適用することで自然に導出される。このとき、EVaR が disciplined 凸最適化問題として求まることを示す。これらの CVaR で定量化した評価関数と EVaR の境界値に基づく拘束条件は一段階の mixed-integer exponential cone programming (MIECP) 問題として定式化できることを述べる。この MIECP 問題は再帰的実行可能性を有していることについても言及する。最後に、数値シミュレーションにより提案手法の性能および設計について考察する。

第 6 章「排出ガス抑制を考慮した燃費最適化」では、PHEV の燃費最適化と同時に排出ガス抑制を達成する手法について取り組む。この排出ガス抑制を達成するために、PHEV にも標準搭載されている三元触媒コンバーターの温度モデルを新たに導入する。三元触媒の温度モデルは 3 つの異なるダイナミクス（暖機機能による急速な加熱・EV モード走行による冷却・HV モード走行による加熱）が切り替わるスイッチドシステムとして表現される。さらに、このスイッチド温度モデルは混合論理的動的システム表現によって拘束条件に含めることができる。暖機タイミングの入力に応じて実際に発生するガソリン消費量を評価関数として組み込み、スイッチド温度モデルの拘束条件には内燃機関始動を許容する触媒温度を設定する。これらの評価関数・拘束条件を走行モード制御による燃費最適化と同時に解くことで、排出ガス抑制を考慮した上での最適なモード切替制御を達成する。数値シミュレーションによる結果は、最も厳しいが現実的な許容触媒温度（300 °C）に対して提案手法が燃費改善を達成することを示す。

第 7 章「結論」では、本論文の結論を述べ、今後の研究課題について論じる。