

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04128

研究課題名（和文）自動運転システムのためのバリア関数を用いた最適化による自動車挙動予測法

研究課題名（英文）Prediction method using optimization with barrier functions for autonomous driving

研究代表者

向井 正和（Mukai, Masakazu）

工学院大学・工学部・教授

研究者番号：50404059

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本課題は、自動運転システムのために適した他車両の挙動予測法を構築することを目的とし、他車両のドライバーの運転を特徴付ける関数を明らかにする。つまり、最適化問題を構成する評価関数と拘束条件とを、ドライバーが暗黙に有している条件に近くできれば、最適化の結果として得られる運転挙動が近くなると考え、適切に構成した評価関数とバリア関数を用いた最適化問題を解くことで、他車両の挙動予測を行う。大きく分けてつぎの3つの課題について取り組み成果を得ることができた。課題1：運転挙動を特徴付ける評価関数とバリア関数の設計・課題2：道路交通情報から挙動予測を行う手法の構築
課題3：交通流シミュレータを用いた検証

研究成果の学術的意義や社会的意義

申請課題に取り組むことで、他車両の運転挙動の予測結果を自動運転システムに利用できスムーズな自動運転が実現できる。そのため、交通システムの安全性と効率を向上させることが可能になり、社会的に意義の高い研究である。さらに、本申請課題の成果は、他の交通参加者である歩行者、自転車などの安全を評価する際にも利用可能と考えられるため、他の研究への波及効果が期待できる。また、交通流のシミュレーションを進めることで、大規模な社会システムの一部である交通システムのシミュレーションの知見ノウハウを得ることが可能である。

研究成果の概要（英文）：The objective of this task is to construct a method for predicting the behavior of other vehicles suitable for automated driving systems, and to identify functions that characterize the driving behavior of the drivers of other vehicles. In other words, we believe that if the evaluation function and constraint conditions that constitute the optimization problem can be made closer to the conditions implicitly possessed by the driver, the driving behavior obtained as a result of optimization will be closer. The following three major issues were addressed and results were obtained. 1) Design of evaluation functions and barrier functions that characterize driving behavior, 2) Development of a method to predict driving behavior based on road traffic information, 3) Verification using a traffic flow simulator

研究分野：制御工学

キーワード：自動車制御 制御工学

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本では、Society5.0の実現を目指し様々な研究が行われている。Society5.0の要素として交通システムも含まれ、他の様々な社会システムと連携したインテリジェント化が検討されている。特に、これから高齢化する日本において自動運転の実現は重要な課題と考えられる。一方、高度な自動運転を可能にする自動運転システムでは、他の車両の挙動をリアルタイムで認識し、協調的に車両を制御する必要がある。そのため、自動運転においてスムーズかつ安全な運転動作を実現するためには、数秒間の自動車の挙動を含む交通状況の予測が求められる。しかしながら、これまでの研究では、自動運転システムに必要な挙動予測は実現できていない。実際のドライバーの運転は、認識、意思決定、動作の段階に分けられると考えられており、自動運転システムに必要な挙動予測のためには、ドライバーの運転を統合的に考えた予測方法が必要である。しかし、ドライバーの運転行動モデル、速度調整、車間距離調整、車線変更などの部分的なドライバーモデルは存在するが、それらを統合に扱えるド手法が存在しない。

2. 研究の目的

本申請課題では、スムーズかつ安全な運転動作を実現する自動運転システムのために適したドライバー挙動予測法を研究する。学術的には、「ドライバーはどのような情報に基づいて、どのように運転行動を決定しているのか」という問いに取り組む。本申請課題は、自動運転システムのために適した他車両の挙動予測法を構築することを目的とする。ここでは、「ドライバーは何らかの最適化に基づいて運転をしているのではないか」という考えをもとに、他車両のドライバーの運転を特徴付ける関数を明らかにする。つまり、最適化問題を構成する評価関数と拘束条件を、ドライバーが暗黙に有している条件に近くできれば、最適化の結果として得られる運転挙動が近くなると考える。そのため、適切に構成した評価関数とバリア関数を用いた最適化問題を解くことで、他車両の挙動予測が可能とする。

3. 研究の方法

本申請課題では、つぎの3つの課題について段階的に取り組む。

課題1：運転挙動を特徴付ける評価関数とバリア関数の設計

最適化問題における、ドライバーが有する評価関数と拘束条件に用いるバリア関数を求める手法を研究する。

課題2：道路交通情報から挙動予測を行う手法の構築

道路から取得できる自動車の走行情報、道路形状などの道路交通情報から、対象の車両の挙動を予測するアルゴリズムを構成する。

課題3：交通流シミュレータを用いた予測手法の検証

実測データを用いた計算機シミュレーションを行い、課題2で構成した予測手法が正しく動作することを検証する。実際の道路環境を模擬した交通流シミュレーションを実施し効果を明らかにする。

4. 研究成果

それぞれの課題について次の成果を得ることができた。

課題1：運転挙動を特徴付ける評価関数とバリア関数の設計

自動車の自動走行に必要な、評価関数と拘束条件（物理拘束とバリア関数）を構築した。具体的には、目標速度との差、加速度の大きさを重み付きの関数として含む評価関数を作成し、道路形状に合わせた拘束条件をシグモイド関数で表現した。また、前方車両との車間距離の関数として制御バリア関数を導入し、衝突しないための制約条件を作成することができた。複数の道路情報を用いて道路形状からバリア関数を作成することができ、評価関数と制御バリア関数を組み合わせたシミュレーションを実施して、基礎的な結果を得ることができた。実際の走行パターンから評価関数の重みを決定し、拘束条件の関数を調整することで、限られた走行パターンではあるものの実際の走行パターンに近い結果を、評価関数と拘束条件を調整することで再現することができた。

課題2：道路交通情報から挙動予測を行う手法の構築

課題1で求めた評価関数と拘束条件を用いて定式化された最適化問題から予測軌道を生成する手法を構築した。評価関数と拘束条件を組み合わせ、非線形最適化問題として定式化して、最適化ソルバで解くことで、軌道を生成することができた。非線形最適化問題を解く計算時間の検討を行い、評価関数のサイズや含める項目を調整して、計算時間を短縮する検討を行なった。最終的には、速度目標値の評価関数の重み調整が重要であるという知見を得ることができた。また、速度目標値が挙動予測を行う際に重要であることが判明したため、他車両の速度目標値を推定することも検討すべき事項として明らかになった。今後、道路状況から目標速度を推定する機構

を作成することで挙動予測の精度を上げる可能性がある。

課題3：交通流シミュレータを用いた予測手法の検証

課題1と課題2で作成した最適化問題を解くことで、最適な走行制御と予測軌道を作成し、交通流シミュレータ(フォーラムエイト社, UC/win-Road)でシミュレーションを行う環境を作成した。課題1と課題2の最適化問題はMATLAB/Simulinkで動作しているが、交通流シミュレータUC/win-Roadとの連携をさせる開発を行い、走行パターンを反映させて交通流シミュレーションを実施することができた。現実の道路データを反映させた交通シミュレータの道路環境を作成し、車両挙動の実測データを入力して、課題2で構築した予測アルゴリズムを動作させた。車両挙動の実測データと提案予測アルゴリズムの結果を比較して、走行パターンを再現することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Hayashi and M. Mukai	4. 巻 -
2. 論文標題 Composition of Automated Vehicle Groups with Control Barrier and Lyapunov Functions Using Slope Information	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IFAC World Congress 2023	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 関根直樹, 向井正和	4. 巻 142
2. 論文標題 車両のグループ化と信号機制御による信号交差点における待ち時間削減と燃費改善	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 746-751
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.142.746	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wenjing Cao, Masakazu Mukai, Taketoshi Kawabe	4. 巻 -
2. 論文標題 A parameter setting method to find the required state estimation accuracy for a motion control method in merging scenario	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Asian Journal of Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/asjc.2666	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Kishi, Cao Wenjing, Masakazu Mukai	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on the formulation of vehicle merging problems for model predictive control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-022-00751-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 X. Zuo, Y. Suzuki, and M. Mukai
2. 発表標題 Study on Model Predictive Control for Electric Wheelchair using Map Information
3. 学会等名 International Symposium on Advanced Technology 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Shimizu, Y. Hayashi, and M. Mukai
2. 発表標題 Study on Fuel Saving Effect of Toy Car Tracking Problem Using Model Predictive Control
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuzuki Hayashi and Masakazu Mukai
2. 発表標題 Collision avoidance control for automated vehicle using multiple upper limits of acceleration
3. 学会等名 6th IFAC Conference on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling, E-COSM 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Eisho Kannno and Masakazu Mukai
2. 発表標題 Study on Driving Skill Analysis in Curve Sections using Adaboost Algorithm with Driving Simulator
3. 学会等名 International Symposium on Advanced Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryohei Takahashi and Masakazu Mukai
2. 発表標題 A study on energy consumption in vehicles using model predictive control during stop and departure operations at an intersection
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林悠月, 向井正和
2. 発表標題 制御バリア関数を用いた自動運転車両の隊列形成に関する一考察
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早川和秀, 向井正和
2. 発表標題 混合整数計画法を用いた高速道路における自動車の合流制御
3. 学会等名 電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------