

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：32613

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18093

研究課題名(和文)安全で省燃費な交通システムのための階層型発車・停車制御

研究課題名(英文) Hierarchical control for safety and low energy consumption of transportation systems

研究代表者

向井 正和 (Mukai, Masakazu)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：50404059

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では省燃費で安全な交通システムの制御を考える。交差点エリアを対象とし交差点を複数考慮信号機制御を構成する。複数の交差点の信号機に対して最適化問題を各制御時間ごとに解く、モデル予測制御と呼ばれる手法を扱う。各道路の交通流量を改善するための評価関数を用いて、混合整数計画法として制御問題を定式化する。計算機シミュレーションで提案手法の有効性を確認し、全く情報を用いない場合と比べて、省燃費化が達成できることを確認する。

研究成果の概要(英文)：This research considers model predictive control of traffic signals and groups of vehicles. The model predictive control method is constructed using inequality conditions including binary variables. The method is carried out by solving mixed integer programming problem. Computer simulation results are shown to confirm the effectiveness of this approach in comparison with the conventional method.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 交通システム 最適制御 モデル予測制御

### 1. 研究開始当初の背景

近年、自動運転の研究・開発が進められている。ドライバの負荷軽減、運転におけるヒューマンエラーの排除などが期待できるが、自動運転が実施できる場面はまだ限定的である。前年までの研究課題において、申請者は、交通信号機の最適制御の研究を行った。この研究結果として最適な走行軌道を生成することが可能となった。しかし、最適走行制御の対象とする車両（ホスト車）の前方の車両（先行車）の交差点における発進・停止挙動の影響で、省燃費効果が弱まってしまうという知見を得た。市街地における車両の走行データを計測し、確認してみると状況や個人差によってかなりのばらつきがあることがわかった。先行車の停車パターンが燃費の良いものでないと、ホスト車の燃費も悪くなる。また、発車の場合は、ドライバの注意力の問題や、反応遅れにより、先頭車から徐々に遅れて後続車が発車しており、交通システム全体の燃費を悪くしていることがわかっている。

一方、現在は高度自動車交通システム技術の開発も進んでおり、車車間通信や路車間通信といった通信技術が利用できる状況になっている。市販の車両としては、停車中にエンジンを停止するアイドリングストップ機能を有する車両も販売され、赤信号で停車する場合に交差点付近でエンジンを停止する機能なども開発されている。

### 2. 研究の目的

発車と停車は関連する車両が連動して制御されていれば、燃費もよく安全である。そこで、交差点付近の自動運転のための制御を想定し、その制御対象となるエリア（制御エリア）では運転を自動化するという着想を得た。しかし、各車両にどのような目標軌道をあたえればいいかは不明である。そこで、申請課題では目標軌道の生成を信号機の省燃費制御を発展することで可能にし、自動運転を行う階層型の制御システムを研究する。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、道路交通システムについて図1のような階層構造を考えて、交差点付近の制御エリアでの自動運転を行う。安全で省燃費な交通システムとするためには、つぎの2つの課題に取り組む必要がある。

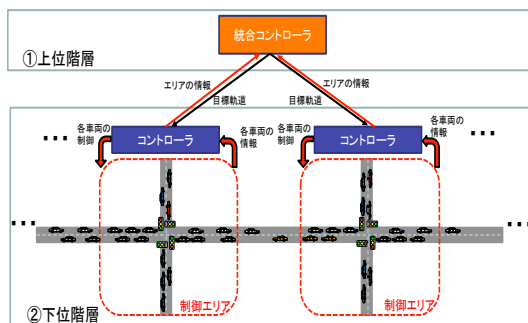


図1 研究課題の対象とする制御構造

課題① 論理混合型コントローラによる各交差点での目標軌道の生成

まず、省燃費化するための軌道を生成する計算アルゴリズムを構成する必要がある。このアルゴリズムの計算では、if-then 規則や論理の記述を組み合わせた0-1変数を含むシステム表現で信号機を有する交通システムを表現し、その最適化を行う。ここでは、交通システム全体の燃費が最適となるような、各制御エリアの目標軌道を求めることを目的とする。また、このような上位の制御仕様を自然言語に近い形式で記述する線形時相論理混合型予測制御という手法が開発されている。この手法を用いることで、問題の記述能力を高め、従来より柔軟な目標軌道を生成する。

課題② 目標軌道追従制御の構成

課題①で生成された軌道に追従するための制御方法を明らかにする。制御エリアに含まれる車両同士がぶつからないようにする必要がある。制御方法については、ITS技術を活用し車車間通信もしくは路車間通信を利用した構成とし、車間追従制御の手法を用いる。

上記の2つの課題に取り組み、2種類のコントローラを組み合わせる階層構造型制御を構成する。本研究課題では、交通流シミュレータを用いた計算機シミュレーションによって有効性を確認する。様々な交通状況をシミュレータで作成し、制御の効果を明らかにする。また、制御エリアの範囲や対象とする交差点の数などもパラメータとして検証することとする。

研究体制は、課題①、課題②とその統合を申請者が担当する。

課題①については、まず目標軌道の生成のために、命題論理を含んだコントローラの構成を試みる。論理混合型ハイブリッドシステム表現で、信号機を含む交差点エリアの挙動を現し、混合整数計画法で自動車の最適軌道を生成する。ここで、発車と停車挙動のデータを基準となる軌道として利用する予定である。申請者は、ハイブリッドシステムの研究を行っており、信号機システムの制御にも取り組んでいるため、これまでの研究を応用することで目標軌道は生成可能である。来年度拡張を行うための、文献調査を始める。

課題②は、車間追従制御の手法を用いて各車両を制御する予定である。車車間通信と路車間通信を利用すると仮定して使用できる情報を明らかにして、制御系を設計する。追従制御のみの場合の計算機シミュレーションを行う。また、課題①と課題②の統合について検討し、有効性を確認するための交通流シミュレータの準備も行う。

2年目は、課題①に関して、上位の制御仕様を論理混合型予測制御を応用し、前年度で記述できない問題について検討し論理混合

型コントローラの拡張を行う。課題①と課題②の統合を行い、交通流シミュレータを用いて制御手法の効果を確認する。制御エリアの範囲や対象とする交差点の数を変化させてシミュレーションを行い、制御エリアの範囲をどのくらいにすれば効果的かを明らかにする。また、計算時間が問題になると考えられるので、交差点の数、車両の数を変えて計算時間に関する考察を行う。計算時間を短縮するために、モデルの単純化や、制御時間を短くするなどの対策が必要であれば検討する。

#### 4. 研究成果

車群モデル： 下図 2 のような車群を考え、複数の車両がまとまってグループを構成し、先頭の車両の位置、速度を得られるとする。



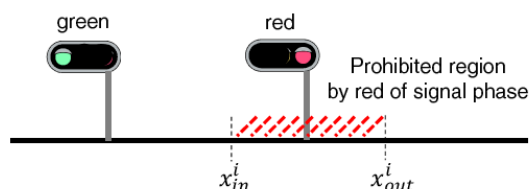
図 2 車群モデル

それぞれの車群の挙動は単純な質量系で考える。

信号機が赤現示の時に交差点に車両が入らないということを表現するために、拘束条件を図 3 のように禁止領域として課す。交差点の始点と終点をそれぞれ考慮して禁止領域を表現する。

図 3 信号機モデル

交差点に設置されている信号機の現示を



0-1 変数で表し、車群に対する拘束条件として、不等式条件を課す。0-1 変数を含む不等式条件を導入することで、信号機の現示に応じた車群の制御が可能となる。簡単のため、黄色現示は今回は赤現示に含んで考える。

モデル予測制御：図 4 のように、縦と横の方向で交差点を分けた上位機構を考える。

##### ・縦方向のモデル予測制御

ここでは縦の方向のモデル予測制御問題を考える。ここでは、車群の制御に加え、信号機パターンも制御する。

評価関数を第 1 項は目標値通りに走行し交通の効率を良くするための項、第 2 項は車群が使用する加速度を抑えるための項、最後の項は赤現示を増やし交差する道路の青現示を増やすための項として構成する。この評価関数は、すべての車群に関する項を加えて複

数の車群を合わせた評価関数とする。

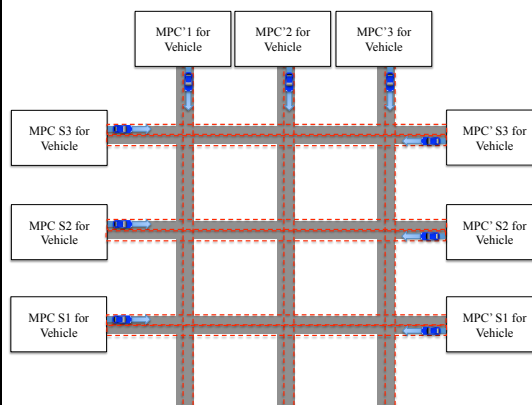


図 4 縦方向と横方向のモデル予測制御

モデル予測制御問題は前述の評価関数と制約条件のもとで最小化する最適化問題を各時間ステップで繰り返し解くことで構成する。上記の最適化問題を用いてモデル予測制御を構成し、1 車線の最適な現示パターンと、車群の最適軌道が求められる。

縦の対向車線も同様に縦のモデル予測制御を用いる。得られた 1 車線の最適な現示パターンと、対向車線で得られた 1 車線の最適な現示パターンの和集合を、縦の車線の現示パターンとする。

##### ・横の車線の制御

横方向の車線は、縦方向の制御で得られた各道路の縦の車線の最適現示パターンを組み合わせてモデル予測制御を考える。ここでは、信号機の現示パターンは制御せず、縦方向の制御で構成されたものをそのまま用いる。

横の車線のモデル予測制御は、各車線で 0-1 変数を代入し、最適化変数を車群の加速度として解くことで、各車群の最適軌道を求めることができる。手法としては 1 台の車両のケースと同じになる。将来の信号機の現示パターンが既知であるとして、車両の最適走行パターンを混合整数計画問題で導出できる。

計算機シミュレーションの結果：図 5 のような設定の道路を考え、提案制御手法を適用する。

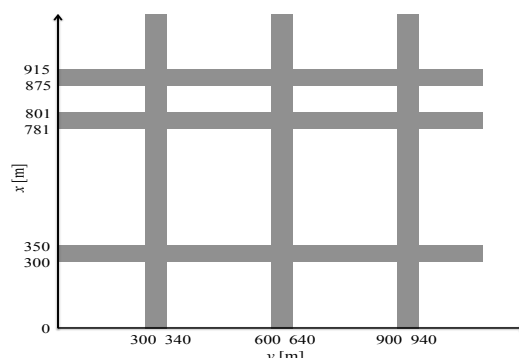


図 5 シミュレーションの設定

最適化問題は最適化ソルバ Gurobi を用いて解いた。車群の初期位置を同じにすると、上記の結果が、縦方向の1から3すべてで得られた。これを横方向の位置で考えると、図のようになる。実際に使われている青信号割合（スプリット）の場合に比べるとかなり青時間は長くできている。この青時間に通過するようにモデル予測制御することが可能である。モデル予測制御により求めた軌道を目標値として、停車発車の制御を行うことで省燃費化ができることがわかった。

縦方向と横方向の連携を取ればもっと効率の良い制御を行えると考えられるが、今後の課題である。また、車両の数を増やしていくと、車群の長さを伸ばしていくと、上記の結果は得られなくなるため、車群の構成について検討が必要である。

複数の交差点の信号機に対するモデル予測制御を考え、各道路の交通流量を改善するための評価関数を用いて、混合整数計画法として制御問題を定式化した。

図6に計算機シミュレーションの結果を示した。

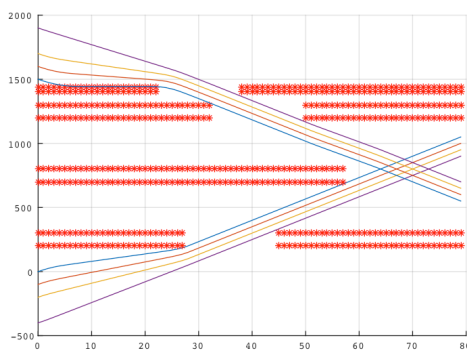


図6 計算機シミュレーションの結果

交差点間の情報のやり取りを工夫するとさらに効率を上げることが可能であるということが明らかになった。今後交差点間の連携についての改良を行いたい。また、実際の道路の情報を用いて、車群の形成についての検討を行うことも今後の課題である。

## 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)

[雑誌論文] (計 2 件)

1 著者名 向井正和, 青木博, 川邊武俊  
論文標題 1車線道路における交通信号機情報と前方車両の挙動予測に基づく省燃費加減速制御  
雑誌名 自動車技術会論文集  
査読の有無 有  
巻 48/1  
発行年 2017  
最初と最後の頁 161-166  
掲載論文のDOI  
謝辞の記載の有無 無

2 著者名 向井正和, 野口凌介, 川邊武俊  
論文標題 混合整数計画法を用いたモデル予測制御による1車線道路への合流経路生成  
雑誌名 計測自動制御学会論文集  
査読の有無 有  
巻 52/11  
発行年 2016  
最初と最後の頁 625-630  
掲載論文のDOI 10.9746/sicetr.52.625  
謝辞の記載の有無 無

[学会発表] (計 4 件)

1 発表者名 H. Natori, M. Mukai  
発表標題 Obstacle avoidance path generation method for the mobile robot using varying search range  
学会等名 Artificial Life and Robotics 2017  
発表年月日 2017年1月21日  
発表場所 Beppu

2 発表者名 向井正和  
発表標題 混合整数計画法を用いた交差点群に対するモデル予測型信号機制御  
学会等名 第7回横幹連合講演会  
発表年月日 2016年11月19日  
発表場所 東京

3 発表者名 向井正和  
発表標題 複数交差点の交通信号機に対するモデル予測制御に関する一考察  
学会等名 第59回自動制御連合講演会  
発表年月日 2016年11月10日  
発表場所 北九州

4 発表者名 名取碩唯, 徳山 浩平, 向井正和  
発表標題 小型ロボットに対する探索範囲可変型障害物回避アルゴリズムの一考察  
学会等名 電気学会C部門大会  
発表年月日 2016年8月31日  
発表場所 神戸

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向井 正和 (MUKAI, Masakazu)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：50404059

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者