

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14187

研究課題名（和文）真なる省燃費自動運転を実現するモデル予測制御の定式化

研究課題名（英文）Formulation of Model Predictive Control Achieving True Eco-Driving of Self-Driving Vehicles

研究代表者

湯野 剛史（YUNO, Tsuyoshi）

九州大学・システム情報科学研究所・助教

研究者番号：10756232

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000 円

研究成果の概要（和文）：交通事故や環境負荷の低減などを目的として、自動車の省燃費自動運転の実現が強く望まれている。とくにモデル予測制御による省燃費自動運転制御が注目されているが、その実現のためにはモデル予測制御問題の定式化をどのように行うべきかを明らかにする必要がある。本研究ではそのための理論的基盤の形成および展開と応用を目的として研究を行った。その結果、評価関数と評価区間の設定に関する重要な知見が得られた。さらに、複雑な数理モデルへの展開や実問題への応用に関する一つの基盤も得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年注目を集めているモデル予測制御による省燃費自動運転制御に関して、その評価関数と評価区間の設定に関する重要な知見が得られた。これにより自動運転における燃費性能の向上が見込まれ、自動車の運転コストや環境負荷の低減につながる。また、本研究の問題意識は省燃費運転の本質に迫る極めて重要なものであるにも関わらず、これまで曖昧にされたまま研究が行われてきた。本研究で得られた知見は、省燃費運転制御の分野における基盤を成すものであると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Development of fuel-economic self-driving vehicles is desired for mitigating traffic accidents, environmental problems, etc. Although the model-predictive eco-driving control have recently attracted great attention, its formulation methodology must be clarified. In this study, we attempted to derive a theoretical foundation of the clarification and to give its extension and practical application. As a result, we obtained important insights into the setting of cost functional and horizon length. Moreover, we developed some bases of their extensions to complicated models and applications to practical problems.

研究分野：制御工学

キーワード：自動車 自動運転 最適制御 モデル予測制御 省エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

交通事故や環境負荷の低減などを目的として、自動車の省燃費自動運転の実現が強く望まれている。そのための手段として最適制御は重要である(図1)。最適制御では、自動車の動的挙動を数理モデルで表現し、運転操作や走行軌跡の「悪さ」あるいは「コスト」を評価関数として表現したうえで、その値を最小化するような最適な運転操作を数理的に計算する。

最適制御は理論的には有効であるが、道路状況(周辺車両の動き、天候など)が長時間にわたって事前予測どおりになるという仮定が必要であるため、現実では使えない。これを解決するのがモデル予測制御である(図2)。モデル予測制御では、自動運転中に常に以下の手順を繰り返す。

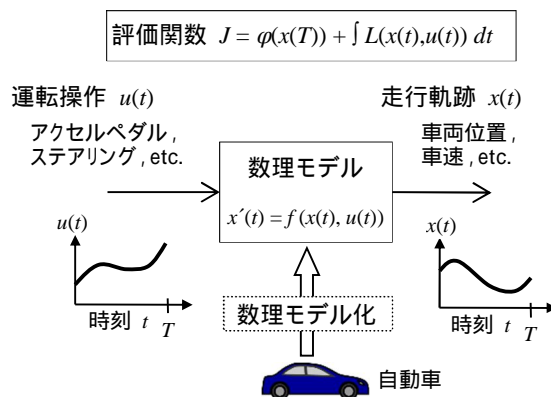


図1 最適制御による自動運転

- 1) 現在時刻から一定時間未来までの時間区間(評価区間)を考える。
- 2) 評価区間上の最適制御問題を(瞬時に)解き、得られた最適な運転操作を実行し始める。
- 3) 微小時間経過した次の瞬間に、手順1に戻る。

ふつう、長さが一定の評価区間が時刻と共に「あとずさり」する Receding Horizon 制御(RH 制御)を行う。時々刻々と予測をやり直すことで現実の道路状況の変化に対応できるため、モデル予測制御に基づく省燃費自動運転の確立は極めて重要な課題であり、近年活発に研究されている。しかしながら、モデル予測制御が有するある特性から、省燃費自動運転の実現のためには以下の二つの疑問に対する答えを明らかにする必要がある。

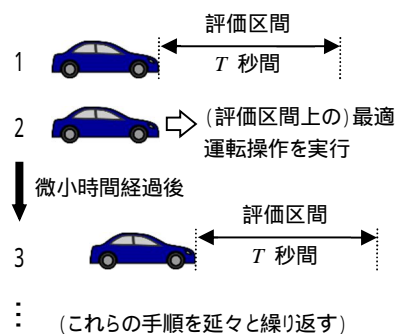


図2 モデル予測制御(RH制御)

- ・ 純粋な省燃費自動運転を実現できるモデル予測制御の定式化はどのようなものか。
- ・ その定式化に基づくモデル予測制御で、どのような運転挙動が得られるのか。

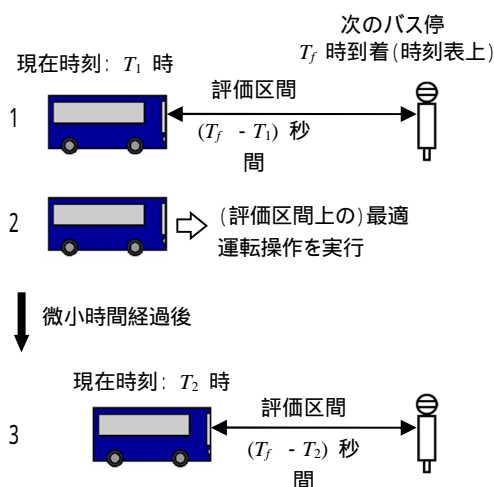
## 2. 研究の目的

本研究の目的は、モデル予測制御で「真なる省燃費自動運転」を行うための理論的基盤の形成とその展開および応用である。そのために、以下の個別目標を設定する。

- (1) 個別目標1 [評価関数] 真なる省燃費自動運転を実現する評価関数を明らかにする。つまり、モデル予測制御(RH制御)において、純粋な省燃費自動運転を実現できる評価関数の具体的な式を明らかにする。
- (2) 個別目標2 [評価区間] 真なる省燃費自動運転を実現する評価区間を明らかにする。つまり、RH制御ではなく、評価区間を可変にした特殊なモデル予測制御を考えることで、純粋な省燃費運転を可能にする。
- (3) 個別目標3 [展開と応用] 得られた理論的基盤を展開し様々な問題に応用する。上記二つの個別目標ではそれぞれ、理論的本質を捉えるために、単純な数理モデルおよび道路環境を対象として理論構築を行うが、それらをより複雑な(現実に近い)数理モデルや道路環境に対して展開する。また、例えば路線バスやタクシー配車など、様々な自動運転サービスに応用する。

### 3. 研究の方法

- (1) 個別目標 1 [ 評価関数 ] については、直感的あるいは理論的に妥当と期待される様々な評価関数を構成し、モデル予測制御の数値シミュレーションを行うことで、省燃費自動運転の効果を比較・検証する。



- (2) 個別目標 2 [ 評価区間 ] については、評価区間が時刻と共に縮小する Shrinking Horizon 制御 (SH 制御) の概念を用いる。例えば、路線バスで次のバス停まで走行制御するときの手順を示せば以下のようなになる ( 図 3 ):

- 1) 現在時刻から、次のバス停の ( 時刻表上の ) 到着時刻までを評価区間とする。
- 2) 評価区間上の最適制御問題を ( 瞬時に ) 解き、得られた最適な運転操作を実行し始める。
- 3) 微小時間経過した次の瞬間、手順 1 に戻る。

図 3 Shrinking Horizon 制御 ( SH 制御 )

また、実時間計算の実現のための工夫 ( 既存の高速な RH 制御用アルゴリズムを SH 制御用に改変する等 ) も行う。

- (3) 個別目標 3 [ 展開と応用 ] に関しては、主に以下の二点について、理論の展開と応用を行う。研究の進捗によっては、さらに多種多様な項目について展開・応用を行う。

[ 数理モデルと道路状況の一般化 ] 例：内燃機関自動車 ( ICEV ) , 電気自動車 ( EV ) , ハイブリッド自動車 ( HEV ) など、さまざまな構造の自動車でも理論展開する；変速機など動力伝達機構の複雑なモデルを組み込む；道路勾配や交通信号、周辺車両などを考慮する。

[ 様々な自動運転サービスへの応用 ] 例：自動運転路線バス、自動運転タクシーの配車。

### 4. 研究成果

- (1) 個別目標 1 [ 評価関数 ] に関して、まず、当初まで考えられてこなかった新たな評価関数を立式した。これは理論的に妥当と期待できる形式であり、既存の評価関数を凌駕する燃費性能が期待できるため重要である。さらに、数値シミュレーションによりその省燃費性能を検証できた。最終的に、定式化された複数の評価関数について数値計算により比較を行った。限られた状況設定において本研究の目的の達成につながる重要な知見を得ることができた。
- (2) 個別目標 2 [ 評価区間 ] に関して、評価区間が時刻と共に縮小する SH 制御による省燃費自動運転を定式化できた。また、既存の高速な RH 制御用アルゴリズムを SH 制御用に改変することにも成功した。さらに、数値シミュレーションによりその有効性を示すことができた。これらにより、特定の状況では真に省燃費な運転操作を計算できると期待できる。
- (3) 個別目標 3 [ 展開と応用 ] に関して、パワートレインに複雑な切り替えを含む場合のモデル予測型省燃費自動運転制御の手法を提案し、数値シミュレーションによりその有効性を実証した。また、パワートレインの効率変化と自由度を最大限に活用したモデル予測型省燃費自動運転を提案し、数値シミュレーションによりその有効性を示した。複雑な数理モデルを用いた場合に本研究の目的を達成するための一つの基盤を作ることができた。さらに、SH 制御による省燃費自動運転の手法を自動運転タクシーの配車サービスへ応用することに成功し、数値シミュレーションによりその効果を実証した。本研究の成果を現実に即した問題へ応用するための一つの基盤をつくることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuno Tsuyoshi, Cao Wenjing, Yasuda Koki, Dai Yangfan, Sawada Takano, Kawabe Taketoshi	4. 巻 16
2. 論文標題 Nonlinear model-predictive driving control of ICE vehicles equipped with CVTs via relaxation of switching behaviours	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 387 ~ 399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/18824889.2023.2281572	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshinaka Shinsaku, Narisawa Satoru, Yuno Tsuyoshi, Cao Wenjing, Mukai Masakazu, Kawabe Taketoshi	4. 巻 16
2. 論文標題 Model predictive eco-driving control of internal-combustion-engine vehicles equipped with CVTs in car-following scenarios	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 109 ~ 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/18824889.2023.2188976	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tsuyoshi Yuno, Tomohiro Hirano, Wenjing Cao, Masakazu Mukai, Taketoshi Kawabe
2. 発表標題 Eco-driving Controller for Meeting Problem in Self-driving Taxi Services under Disturbances
3. 学会等名 IFAC World Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tsuyoshi Yuno, Tomohiro Hirano, Taketoshi Kawabe
2. 発表標題 Model-Predictive Eco-driving Control of Electric Vehicles for Automated Dispatch Systems
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------