

## [研究助成 (C)]

## 他者とのインタラクションを考慮したハイブリッド型モデル 予測制御による運転知能の創出

Autonomous Driving using Hybrid Model Predictive Control Considering Interactions  
with Other Traffic Agents

2217009



研究代表者  
(助成金受領者)  
共同研究者

名古屋大学  
大学院工学研究科  
名古屋大学  
大学院工学研究科

博士後期課程  
教 授

本 田 康 平  
鈴 木 達 也

## [研究の目的]

近年、自動車事故の低減などの期待から、自動運転に関する研究開発が世界中で盛んに行われている。しかしながら、現状の技術到達点は、特定の環境下（自動車専用道や都市の一部など）におけるLv. 4自動運転に留まっている。自動運転の普及を困難とする要因の一つとして、動的かつ多様な運転タスクを達成する必要性が挙げられる。運転タスクは自車の目的や交通ルール、道路形状、周辺他者の挙動などの組み合わせによって定義され、それらは時々刻々と変化する。すなわち、多種多様な運転行動要因の組み合わせによって、実行すべき運転タスク数が爆発的に増加する。そのため、運転行動計画システムは膨大な運転タスクを達成することが可能であるような、非常にスケーラビリティの高いものである必要がある。

自動運転のもう一つの難しさとして、周辺他者とのインタラクションの考慮の必要性が挙げられる。都市部のような、手動運転車両や歩行者などの他の交通参加者の混在する環境において、人間ドライバは自らの動きに対する周辺他者の反応を予測し、それに応じた運転行動を実行することによって円滑な協調行動を実現している。自動運転車両も同様に、単に動的な障害物として他者を回避するのみならず、自車の動きと周辺他者の動きのインタラクションに対す

る予測を行い、それに応じた運転行動を実行することが求められる。その場合、周囲の交通参加者の数や種類は流動的であるため、解くべき制御問題の状態空間が時々刻々と変化するという特徴がある。

上記のような背景から、本研究の目的は、多様かつインタラクティブな運転タスクに対して拡張性を備えた運転行動計画システムの創発と定めた。システム制御論的な観点から述べると、本研究の目的は、解くべき制御問題の状態空間や目的、制約条件が時々刻々と変化するような環境下において、少ない設計要素で効率的に多くの運転タスクを達成可能なフレームワークを実現することである。

## [研究の内容、成果]

本研究では、上記の目的を達成するために、モデル予測制御（MPC; Model Predictive Control）と呼ばれる制御理論を基盤として研究を進めた。MPCは有限時間先までの最適制御問題（OCP; Optimal Control Problem）を実時間で解くことによって対象の運動を制御する、という手法であり、その特徴として、予め設計した最適化問題に応じて柔軟な運動を実現可能であるという特長がある。本研究では大きく以下の3つの研究課題に取り組んだ。

## 1. 状態空間等の異なる OCP の滑らかな切り替え

MPC は、状態空間・予測モデル・コスト関数・制約条件等から構成される OCP を予め設計者が設計し、それを実時間で解くことによって所望の運動を実現する方法である。そのため、OCP を上手く設計することで、多様なタスクを実行可能であるというポテンシャルを秘めている。従来から自動運転に関しても多くの OCP が立式され、レーンチェンジ、信号無し交差点右左折、歩行者回避など、多くのインタラクティブな運転タスクに対する各タスク専用の OCP が提案されている。しかしながら、必要な OCP は各運転タスクごとに異なり、それら全てのタスクを一つの共通な OCP で達成することは設計の困難さや状態空間の増大などによって現実的な方策ではない。そのため、実際に MPC によって多様な行動を達成するためには、図 1 のようにいくつかの OCP を運転タスクごとに設計し、それらを時系列で切り替えながら走行する必要がある。

OCP の切り替えにはいくつかの困難が伴う。例えば、そのうちのひとつとして、切り替え時の実行可能性 (feasibility) の確保が挙げられる。OCP は各々定義された状態空間と制約条件を持ち、それらによって実行可能領域が定められる。MPC は基本的に実行可能領域内に状態が存在するように制御対象を制御する。逆に言うと、状態が実行可能領域に存在しない場合は制御が実行不可能 (infeasible) となる。そのため、状態空間等の異なる OCP を滑らかに切り替えながら走行するためには、切り替え時に実行不可能とならないように状態を誘導してから



図1 ハイブリッドMPCによる自動運転

切り替える必要がある。

本研究は、図2のように切り替え前後の任意の非線形 OCP が与えられたときに、それらを滑らかに切り替えるための方法を提案した。提案手法は、切り替え前後の OCP から二つの OCP を橋渡しするような中間的な OCP を生成し、その中間 OCP を経由する。その結果、実行不可能とならず、かつ (コスト関数的にも) 滑らかな切り替えを実現する。本手法の最大の特長は、2つの一般的な OCP を切り替える際に設計者のヒューリスティックな設計が不要であることである。そのため、仮に膨大な数の OCP を切り替えながら走行する場合にも、本手法は適用可能である。

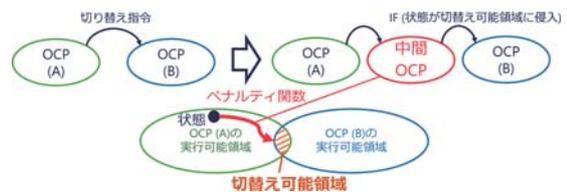


図2 提案法：中間 OCP による滑らかな OCP 切り替え

## 2. 運転状況に応じた OCP のオンライン自動生成

前述のように、多様な運転タスクに対しては多様な OCP が必要である。しかしながら、自動運転を達成するための運転タスクの数は膨大であり、それらの OCP を一つずつ設計することは、システムの拡張性の面で非効率的である。本研究では、多様な運転タスクを OCP によって効率的に表現するために、図3のように、OCP を状況に応じて半自動的に生成し、それらを切り替えながら走行するシステムを提案した。提案手法は、運転タスクが複数の運転行動要因 (設計要件) の組み合わせ的に定義されるという特徴を鑑みて、予めいくつかの OCP の最小構成要素 (OCP Primitive) を用意しておくことによって、OCP をリアルタイムに生成する。OCP Primitive から OCP を組み立てる際には、OCP Primitive に対して定義された 2 項演算子

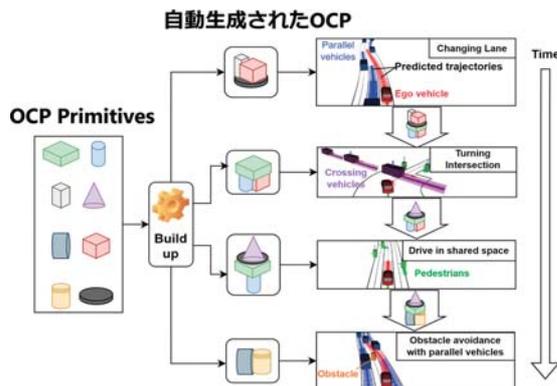


図3 提案法：OCPのオンライン自動生成

が用いられる。また、生成されたOCPは、前述の切り替え手法(1)を用いて滑らかに切り替えられる。

構築したシステム(図4)は図5のように、典型的な4つの運転シナリオにてシミュレーションによって検証され、結果として従来の設計要素数の5分の1程度の設計要素で同等以上の運転タスクを達成可能であることが示された。また、(1)で述べた滑らかなOCPの切り替え手法によって、切り替え時の実行不可能性が回避され、全てのシナリオにおいて成功率が最大で10%程度向上することが確認された。

本システムのユニークな特徴として、異なる

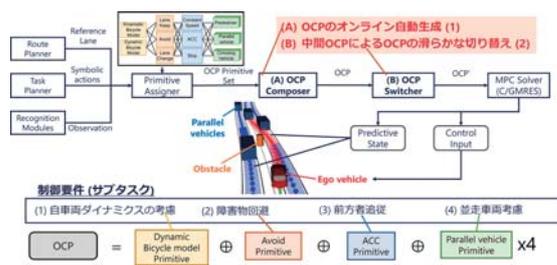


図4 構築したマルチタスク運転行動計画システム

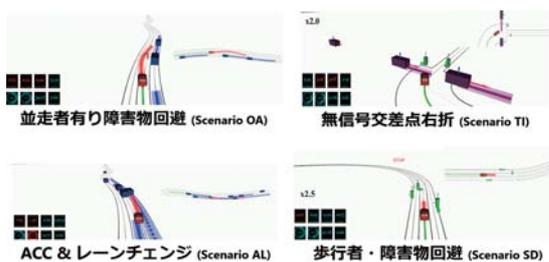


図5 複数シナリオにおけるシミュレーション

状態空間に対しても対応可能である点が挙げられる。そのため、システムは周囲の交通参加者に応じて異なる状態空間を持つOCPを生成かつ、切り替えながら走行し、周囲の交通参加者とのインタラクションの考慮が可能である。なお、OCP生成から最適化計算までを実時間で実行可能である点も特筆すべき点である。

### 3. 多峰性最適行動分布に対する効率的な解探索

上述の研究によって、運転状況に応じて様々なOCPがリアルタイムに生成され、それらが滑らかに切り替えられることによって多様な運転タスクを実行可能であることが示された。しかしながら、それらのOCPはしばしば非線形かつ多目的な最適制御問題となりうる。そのため、これらのOCPを実際にソルバーで解くに当たって、その最適な行動の分布は多峰性となり、ソルバーにおける効率的な最適解の探索が困難となる、あるいは、数値的に解が不安定になりやすい。例えば、最適行動分布が多峰性である最も単純な例として、前方の障害物を回避するシーンが挙げられる。この場合、障害物回避のために障害物に衝突しないという非凸な制約条件を含むOCPの解は、障害物を右に回避する行動と左に回避する行動の二つのモードを持つことが考えられる。

加えて、自動運転の実用上、OCPのコスト関数や制約条件に微分不可能な項を含めることによって運転タスクを表現したい場合も多々ある。以上の要求を踏まえると、非線形かつ微分不可能なOCPにも対応可能な多峰性行動分布のための効率的な最適解探索ソルバーが自動運転には求められる。

本研究では、モデル予測経路積分制御(MPPI; Model Predictive Path Integral control)というMPCのためのサンプルベース解法の一つを改良することによって上記の課題の解決を目指した。MPPIは、行動分布をガウス分布として近似し、最適な行動分布を変分推論のテクニックによって効率的に近似する方法である。

すなわち、最適行動分布との Kulback-Leibler (KL) divergence を最小化するようなガウス分布形状の行動分布が最適解として求まる。しかしながら、前述の多峰性行動分布に対しては、KL divergence の最小化によって、図6のように、ガウス分布が複数のモードを覆ってしまい、意図しない（非最適な）行動が生成される場合がある。

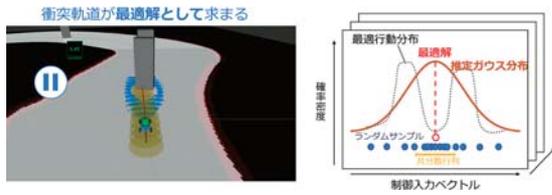


図6 MPPIの課題

そこで本研究では、Stein Variational Gradient Descent (SVGD) という方法を MPPI と組み合わせることによって、多峰性行動分布に対しても単一のモード解のみを効率的に探索する手法（図7）を提案した。提案手法では、SVGD によって収束するターゲットモードを探索し、MPPI によって最適解を算出する。その結果、効率的に一つのモードのみをカバーするような最適なガウス行動分布を（閉形式で）求めることが可能となる。

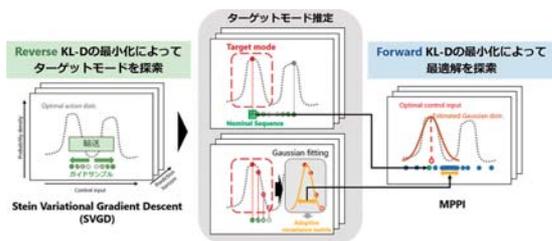


図7 提案法：Stein Variational Guided MPPI

提案手法はシミュレーションや1/10スケールの小型車両実機実験を通して検証され、MPPI やその他従来手法と比較して、高い経路追従性能や障害物回避性能を示すことが確認された（図8）。ただし、図5のシステムに本提案手法を組み込むことは今後の課題とする。

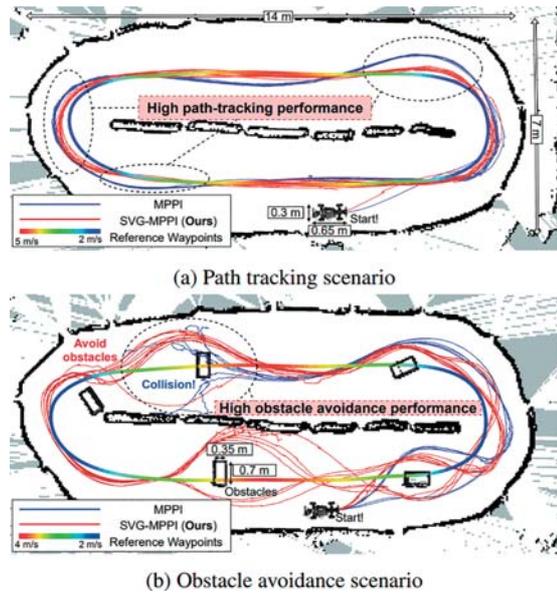


図8 提案法の実機実験による比較検証

【今後の研究の方向、課題】

本研究では、多様かつインタラクティブな運転タスクに対して拡張性を備えた運転行動計画システムの創発を目指し、その一部を実現することができた。しかしながら、本研究においては以下の課題が残されている。

1. 実環境シナリオにおける検証

提案した図4の運転行動計画システムは現状、手作りのシナリオにおけるシミュレータ検証に留まっている。一方で、実環境ではセンサノイズや他者の挙動の予測精度の低下などの問題が伴う。そのため、提案手法が実環境において、どこまで有効で、どのような課題が残されているかを明らかにするためにも、実交通環境を基に作成した運転シナリオにおける検証や、実機による検証などが必要である。

2. OCPの完全な自動生成

提案法では手動で設計したOCP Primitiveを組み合わせてことによってOCPを生成している。しかしながら、OCP Primitiveの設計自体が設計者のヒューリスティックな設計を必要と

する。そのため、より多様なタスクに柔軟に対応するためには、OCPを完全に自動生成することが望ましい。一つの有望な方法として、近年発展が目覚ましい自然言語処理技術との融合が挙げられる。つまり、OCPはある意味、運転タスクの言語表現方法の一つと捉えることが可能であり、Large Language Model等を用いることで、運転状況からOCPを自動生成することが可能であると考えている。

### 3. 多峰性最適行動分布の求解

提案した最適解探索手法は、多峰性行動分布に対して単一モードのみを高速に求解することに特化している。一方で、自動運転ではしばしば複数のモードを近似することが有効である場合がある。例えば、信号無し交差点右折の際に、対向車両の位置や速度に応じて停止するか、右折を開始するか等の2つのモードが存在するが、このような多峰性分布を多峰性のまま推論することができれば、複数の有効な行動選択肢の中から最適なものを選択することが可能である。そのため、多峰性最適行動分布を高速に求解する手法の開発が求められる。

[成果の発表, 論文など]

#### 学術論文

1. Kohei Honda, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki, Akira Ito, "Connection of Nonlinear Model Predictive Controllers for Smooth Task Switching in Auto-

nomous Driving", Asian Journal of Control, Vol. 25, No. 3, pp. 1805-1822, 2023.

#### 国際会議発表

1. Kohei Honda, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki, Akira Ito, "MPC Builder for Autonomous Drive: Automatic Generation of MPCs for Motion Planning and Control", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 1-8, 2023
2. Kohei Honda, Naoki Akai, Kosuke Suzuki, Mizuho Aoki, Hirotaka Hosogaya, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki, "Stein Variational Guided Model Predictive Path Integral Control: Proposal and Experiments with Fast Maneuvering Vehicles", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2024 (in print).

#### 国内会議発表

1. 奥田裕之, 本田康平, 鈴木達也, "柔軟なタスク実行を実現するモデル予測制御の切り替え手法", 第22回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, Vol. 3, No. B1-04, pp. 2507-2510, 2022.
2. 寺野玲央, 本田康平, 奥田裕之, 鈴木達也, "合流車両に配慮した本線車両のモデル予測型速制御", 自動車技術会学術講演会 春季大会, Vol. 22, No. 9, pp. 1-6, 2022.
3. 奥田裕之, 本田康平, 鈴木達也, 伊藤章, "モデル予測制御器のオンライン自動生成による多様な運転タスクの実現", 第10回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, Vol. 10, pp. 3M5-1, 2023.
4. 本田康平, 赤井直樹, 鈴木康介, 青木瑞穂, 細萱広高, 奥田裕之, 鈴木達也, "Stein 変分勾配降下法を用いた多峰性行動分布に対するモデル予測経路積分制御", 第29回ロボティクスシンポジウム, 2024, (in print)