

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04533

研究課題名（和文）タスク切り替え型モデル予測制御の実現と実験的検証

研究課題名（英文）Realization and validation of task switched model predictive control

研究代表者

奥田 裕之（OKUDA, HIROYUKI）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90456690

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：一般道における自動運転車の多様なタスクを実現する行動計画の実用化を目指し、モデル予測制御の枠組みを用いて、多種多様なタスクを実時間に自動生成しながら、並列・直列にマルチタスク実行をするシステムを提案・検証した。単純かつ小規模なタスクを表現する最適化問題の部分問題であるMPCプリミティブを複数定義し、複合的なタスクをこれらの組み合わせとして表現、複合タスク用のMPCを実時間に合成する。さらに、複合タスク用MPC間をスムーズにつなぐ中間MPCをも自動生成することで滑らかかつ可解性を保ちながら複数の複合タスクを切り替えることが可能となった。また非線形MPCの高速解法を適用し、実時間実行性も確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案した手法は、自動運転の分野のみならず、複数の達成目標や制約条件が実時間に並列または直列に変化するような複雑なマルチタスクシステム一般を対象としており、ロボットやプラント制御など広い分野での応用が期待される。このような問題に対し、マルチタスク内で考慮すべき共通の要素を抽出、MPCプリミティブと定義することで、これらの組み合わせによる膨大な種類の自動制御を自動で設計・実行できるため、大幅にシステムの設計時間を短縮することができる。MPCの産業応用は幅広く、制約を考慮できる等、システムの安全・安心の向上にも寄与できるため、多様な分野で実用化が進めば大きな経済効果が期待できると考える。

研究成果の概要（英文）：We proposed and verified a system that automatically generates a wide variety of tasks in real time and performs multitasking in parallel and in series using a model predictive control framework. The system defines multiple MPC primitives, which are subproblems of the optimization problem that represent simple and small tasks. The complex tasks consist of combination of these primitives, and are synthesized in real time. Furthermore, by automatically generating intermediate MPCs that smoothly connect MPCs for composite tasks, it is possible to switch between multiple complex tasks while maintaining smoothness and continuous feasibility. A fast nonlinear MPC solver was also applied for the realization of real-time computability for practical use.

研究分野：制御応用

キーワード：モデル予測制御 自動運転 ハイブリッドダイナミカルシステム

1. 研究開始当初の背景

人々の生活の中に広がり始めた、高度なインテリジェンスを必要とする知的機械の一つとして、自動運転車両がある。特に自動車専用道路ではない一般道における自動運転では、前方車への追従や、車線維持、右左折、車線変更、信号停止、歩行者の回避など、運転中に多様なタスクを並列的に実行し、これらを逐次的に切り替えながら走行する必要がある。多様なタスクは環境情報に応じて非同期に開始・終了するため、現実的にあり得る並列的なタスクの組み合わせや、その切り替えに伴って膨大な種類の複合タスクが定義される必要があり、これをすべて手で設計するのは非常に困難であった。多様なタスクを統一的に記述できる汎用的な制御器を用いながら、それぞれのタスクの切り替えを考慮でき、これらのタスクの並列・逐次的な実行、切り替えをシームレスに繋ぐことができ、なおかつ、得られた解が車両の物理的制約や、衝突回避などの安全性制約を満たすことを保証できるような、一見すると夢のような制御手法が強く望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、実現したいタスクの変化に伴って、制御対象となるモデル、制約条件、目的関数などが動的に変化するようなシステムに対し、新たな制御器設計アルゴリズムの提案、実装、動作検証を行う。

自動車の自動走行をターゲットに、自車、あるいは周辺エージェントの挙動予測モデルを用いて、数秒先までの挙動予測を行いながら拘束条件を充足しつつ、コスト関数を最適化するような車両への入力を求める手法であるモデル予測制御 (model predictive control : MPC) をベースに、タスクの分割と統合の考え方に基づいた MPC の自動生成とそのスムーズな切り替え実行が可能となる手法を確立する。また、シミュレーションを用いて、提案手法の有効性を検証する。

3. 研究の方法

上記のような目的を達成するために、

- (1) 多様なタスクの並列実行・逐次切り替え実行を可能とする制御アーキテクチャの立案
- (2) 提案するアーキテクチャを実現する具体的なアルゴリズムの構築
- (3) 実時間計算を実現可能とする計算機の実装とシミュレーションによる評価

の手順で研究を進めた。特に、(1)においては、

- (A) 複数の異なるタスクの並列実行を実現するには、これらのタスクの組み合わせ的な数の制御器を設計する必要があり、これらの制御器設計を劇的に簡単にするため、タスクの分解と統合による自動構成方法を模索する
- (B) 上記のように自動設計した制御器は異なる状態空間や目的関数、制約条件を持つため、これらを逐次的に切り替える際、可解性を保ちながらスムーズに切り替える方法を模索する

の2つに問題を分割し、それぞれに対して解決策を考えた。

提案の段階では、実機などを含めた提案手法の検証についても述べていたが、本研究を進めるにつれ、当初の予定以上に良くできたアーキテクチャおよびその実現アルゴリズムを構成することができたため、実機実験に時間を割くよりもアルゴリズム自体のさらなる洗練化に注力することにしたため、本研究ではシミュレーションを用いた検証を行った。

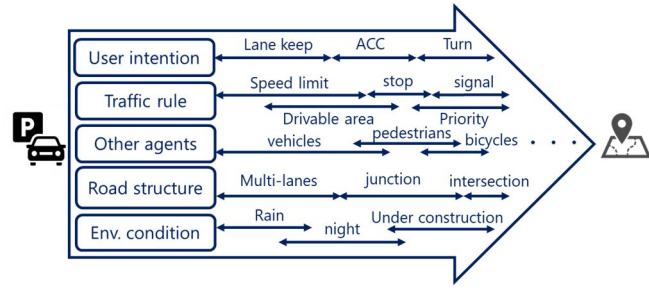


図1. 運転シーンにおける多様なタスクとその並列・逐次的な切り替わり



図2. 従来的なコントローラ的设计

4. 研究成果

1. 取り組んだ問題

一般道における自動運転を例に考える。一般道では多様な交通シーンが存在するため、図1のように、状況に応じて様々な達成すべき走行タスクが生じる。この時、複数のタスクが同時に実行される必要があったり、一部のタスクが発生・終了したりと、逐次的な切り替えと並列的な実行が混在した複雑な行動計画・制御を行う必要がある。

従来、マルチタスクを実行する行動計画・制御器としては、図2のように複数の行動計画・制御器が逐次的に切り替わりながら実行されるものが良く用いられてきた。このそれぞれのモジュールは、例えば車線追従+障害物回避、といった複合的なタスクを実行するものもあったが、図1のような多様なタスクが入り混じる場合、これらのタスクの発生しうるすべての組み合わせについてコントローラを設計する必要があった。本研究ではこの組み合わせに起因する設計の困難さを解決する。

2. 問題解決のアイデア

(1) 多様なタスクの並列組み合わせの実現

本研究ではこのような問題に対して、複合的なタスクを、レーン追従、前方車両追従、あるいは車両モデルを考慮する、等の、より小さなサブタスクに分解し(タスクのプリミティブ)、設計者はこれを小さな最適化問題として記述する。そのうえで、走行中の各状況において、必要なサブタスクを組み合わせて、最適化問題を実時間またはオフラインで合成する(図3)。

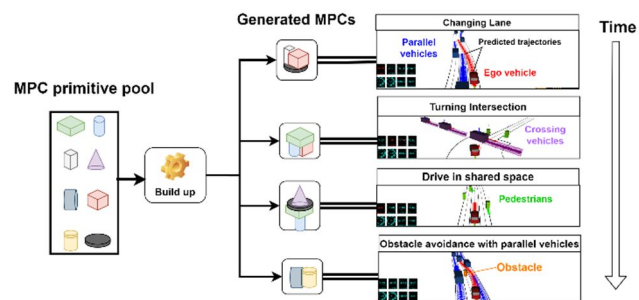


図3. タスクの要素からの複合タスクの自動生成

具体的には、あるタスク i を達成する最適化問題 O^i が、状態空間 X^i 、入力空間 U^i 、コスト関数 J^i 、状態方程式 f^i 、等式制約条件 h^i 、不等式制約条件 g^i の組み合わせ $O^i = \{U^i, X^i, J^i, f^i, h^i, g^i\}$ としてかけるとき、タスク間を合成する演算子 \oplus を定義し[文献 1,2 特許 1]、その状況に必要なサブタスク群 $\{O_i\}_{i \in S_t}$ から時刻 t で必要とされる合成タスク O^t を $O^t = \oplus_{i \in S_t} O^i$ として各タスクの要素を”組み合わせる”ことで、複合タスクを実行する最適化問題を構築する。ここで、状態空間や入力空間は互いの直積空間として、状態方程式や制約条件は和集合として、コスト関数はスカラー

一和として、定義することで、演算子 \oplus 、すなわちサブタスク間の結合を考慮することができる。このようなタスクの分解と統合によるモデル予測制御の自動的再構成フレームワークを「MPCビルダ」と呼ぶことにする。

(2)異なるタスク間のスムーズな切り替えの実現

図1にあるような並列・逐次的なマルチタスク実行は、上記のMPCビルダを用いて生成したMPCを図2のように逐次的に切り替えることで実現できる。しかしながら、解くべき問題を切り替える際にはその切り替え可能性に注意が必要である。

例えば複合タスクAを実行するMPC Aから、複合タスクBを実行するMPC Bに切り替える場合、切り替えた瞬間にMPC Bの制約条件を満たしていないとすると、最適化問題は解くことができない。上位システムにあらかじめMPC Bの制約を教え、遷移を禁止する方法もあるが、この場合上位のシステムは任意の複合MPC間の遷移に対して予測も含め遷移可能な条件を把握・管理・チェックする必要があり、上位システムの設計自体が困難になる。

そこでAからBへの切り替えが指令されたとき、MPC Bの制約条件をチェックし、MPC Bの制約を満たすならBを実行し、そうでなければAを引き続き実行しつつ、Bの制約をできるだけ満たすように制御する中間MPC(intermediate MPC: iMPC)を自動生成する手法を提案した。MPC AからMPC Bへ遷移する際のiMPC、 $O^{A'}$ は、 $O^{A'} = \{U^A, X^A, \{J^A, c(h^B, g^B)\}, f^A, h^A, g^A\}$ として記述できる。ここで $c(*)$ は等式・不等式制約をソフト制約に変換するペナルティ関数であり、このMPC A'を用いることで、MPC Aの制約を守りタスクAを実行しながら、MPC Bの可解な状態空間の部分領域に誘導することができる。その後、MPC Bの可解な状態に到達すれば、MPC Bに切り替える。ただしMPC A'を用いてもMPC Bの可解な状態に必ずしも到達可能であるとは限らないため、実用上はタイムアウトを設け、MPC Bへの遷移が不可能であることを上位システムに通知するようなシステムとして構成した。

3. 実装

上記のように得られた最適化問題をMPCに用いることで、複合タスクを達成できる。MPC Primitiveとして定義するモデルや制約条件によっては非線形な問題となるため、非線形なモデルでも高速に現実的な解を得ることができるC/GMRES法を用いMPC solverを実装した。ただしMPCビルダの枠組みでは、組み合わせるべきサブタスクにより状態空間のサイズや制約条件の数が動的に変化するため実装に注意が必要である。

提案するMPCビルダコンセプト全体の概要を図4に示す。左側はMPCビルダの上位システムであり、周囲の状況を認識し、レーン走行計画やルートプラン、障害物検知などを行う。これ

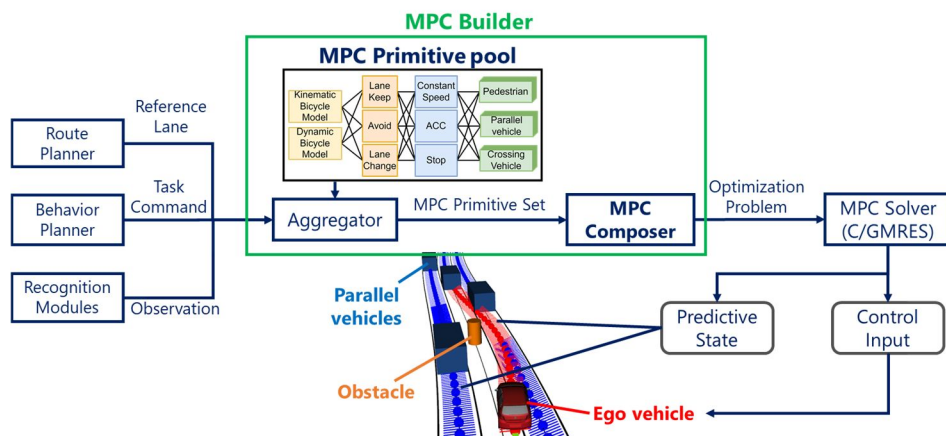


図4. 提案システム全体の概要

らの情報はMPCビルダに提供され、事前に定義された様々なサブタスク(図中のMPC primitive)

の中からシーンに応じて必要なものをピックアップし、集合として MPC Composer に渡す。

MPC Composer は、サブタスク集合から複合タスクを合成する。そのうえで、新たな複合タスクに切り替えることが指令されたら、その前後の MPC が切り替え可能かチェックし、切り替え可能であれば新たな MPC を後段に渡し、もしこれらが切り替え不可能であれば iMPC を生成して後段に渡す。後段の MPC ソルバでは、上記のように構成した最適化問題を Receding horizon control の考え方に基づいて、C/GMRES 法を用いて実時間実行する。その結果得られた最適な入力を車両に投入し、自律走行が達成される。

4. シミュレーションによる評価

図5にシミュレーションの様子を示す。図中下部には、事前に定義されたサブタスク群と、現在アクティベートされているサブタスク(図中の>>で示されたもの)が示されている。また、右下に状態空間の次元数(図中では24)が示されている。この状態次元は選択されたモデルや他者の予測モデルに従って増減する。

4つの走行シナリオにおいて、事前に設定した MPC primitive の数と、走行中に自動生成された複合 MPC の数を表1に示す。わずかな数の MPC primitive を設計するだけで、これらの組み合わせとして多数の複合的 MPC が合成できていることがわかる。また、図6に示すように、計算時間は状態次元数が36次元の場合でも10msec以内に収まっており、実時間アプリケーションにも十分応用可能な計算速度が達成できていることがわかった。

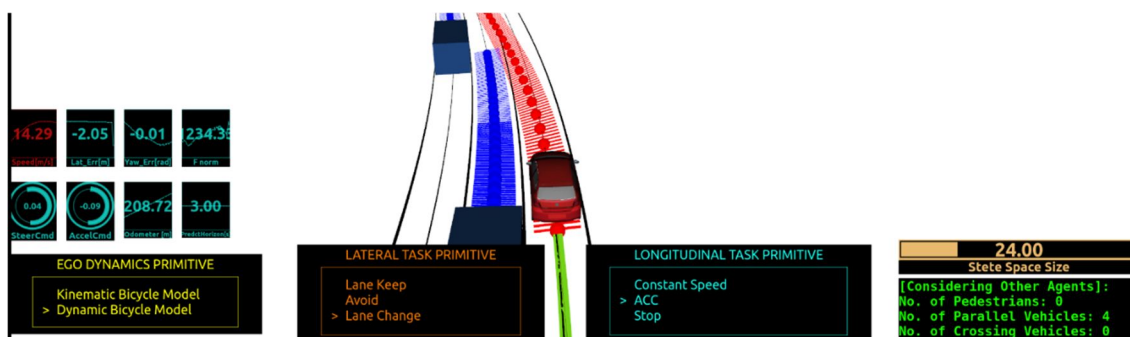


図5. シミュレーションによる検証

表1. 各シナリオで自動生成された複合 MPC の数

Scenario	AL	OA	TI	SD
使用したMPC primitiveの数	6	6	5	6
生成されたMPCの数	26	30	11	16

AL:追従&車線維持 OA:障害物回避
 TI:交差点右折 SD:横断歩行者回避

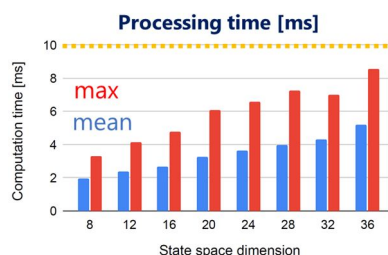


図6. 1制御周期あたりの計算時間

[1]本田 康平, 奥田 裕之, 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”, 計測自動制御学会第10回制御部門マルチシンポジウム(MSCS2023), 3M5-1, Mar. 8-11, 立命館大学, 草津市, 2023

[2] Kohei Honda, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki, Akira Ito, “MPC Builder for Autonomous Drive:Automatic Generation of MPCs for Motion Planning and Control”, 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), June 5th, 2023(accepted)

[関連特許1] 移動体の制御装置, 伊藤 章, 鈴木 達也, 奥田 裕之, 本田 康平, 特願 2021-158118, 2021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5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 奥田 裕之	4. 巻 52
2. 論文標題 行動の予測と誘導に基づく他交通参加者への配慮の実現	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 交通科学	6. 最初と最後の頁 18～23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34398/kokaken.52.1_18	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 Kawaguchi Masato, Tran Anh Tuan, Okuda Hiroyuki, Suzuki Tatsuya	4. 巻 14
2. 論文標題 Development and evaluation of driving speed controller for lane merging considering surrounding driver's intention toward stress-free driving	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 128～139
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/18824889.2021.1939627	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 Okuda Hiroyuki, Suzuki Tatsuya, Harada Kota, Saigo Shintaro, Inoue Satoshi	4. 巻 22
2. 論文標題 Quantitative Driver Acceptance Modeling for Merging Car at Highway Junction and Its Application to the Design of Merging Behavior Control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	6. 最初と最後の頁 329～340
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TITS.2019.2957391	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 青木 瑞穂, 本田康平, 奥田裕之, 鈴木達也	4. 巻 53-3-2
2. 論文標題 モデル予測型経路追従制御における車両運動予測モデルの比較検証	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	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 本田 康平、奥田 裕之、鈴木 達也	4. 巻 52
2. 論文標題 非線形モデル予測制御を用いたレーンチェンジにおける行動決定・経路計画・制御の同時実行	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 100 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11351/jsaeronbun.52.100	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 Honda Kohei, Okuda Hiroyuki, Suzuki Tatsuya, Ito Akira	4. 巻 25
2. 論文標題 Connection of nonlinear model predictive controllers for smooth task switching in autonomous driving	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Asian Journal of Control	6. 最初と最後の頁 1805 ~ 1822
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asjc.2892	査読の有無 無
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 Ito Nobuaki, Okuda Hiroyuki, Suzuki Tatsuya	4. 巻 37
2. 論文標題 Configuration-aware model predictive motion planning for Tractor?Trailer Mobile Robot	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 329 ~ 343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2022.2126733	査読の有無 無
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 Muraleedharan Arun, Okuda Hiroyuki, Suzuki Tatsuya	4. 巻 7
2. 論文標題 Real-Time Implementation of Randomized Model Predictive Control for Autonomous Driving	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Intelligent Vehicles	6. 最初と最後の頁 11 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIV.2021.3062730	査読の有無 無
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14件(うち招待講演 0件/うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Tatsuya Ishiguro, Takuma Yamaguchi, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki,
2. 発表標題 Model Predictive Collision Avoidance for Non-Convex Environment Using Projected C-Space
3. 学会等名 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuaki Ito, Hiroyuki Okuda, Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Configuration-aware Model Predictive Motion Planning in Narrow Environment for Autonomous Tractor-trailer Vehicle
3. 学会等名 Proceedings of 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society(IECON2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuma Yamaguchi, Tatsuya Ishiguro, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Model Predictive Path Planning for Autonomous Parking Based on Projected C-Space
3. 学会等名 The IEEE Intelligent Transportation Systems Society Conference (ITSC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Bui Tu Ha, Arun Muraleedharan, Srishti Sinha, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki,
2. 発表標題 Design of Fail-safe Model Predictive Controller for Sudden Changes in Driving Scenes
3. 学会等名 The IEEE Intelligent Transportation Systems Society Conference (ITSC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mizuho Aoki, Kohei Honda, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Comparative Study of Prediction Models for Model Predictive Path-Tracking Control in Wide Driving Speed Range
3. 学会等名 2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本田康平, 奥田裕之, 鈴木達也
2. 発表標題 非線形モデル予測制御を用いたレーンチェンジにおける行動決定・経路計画・制御の同時実行
3. 学会等名 自動車技術会2020春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuaki Ito, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Model predictive driving for tractor-trailer mobile robot with an omni-directional tractor
3. 学会等名 2020 59th Annual Conference of SICE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohei Honda, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Multi-Task Model Predictive Control Based on Continuation with Intermediate Mode
3. 学会等名 The IEEE Intelligent Transportation Systems Society Conference(ITSC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Arun Muraleedharan, Anh Tuan Tran, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Scenario-Based Model Predictive Speed Controller Considering Probabilistic Constraint for Driving Scene with Pedestrian
3. 学会等名 The IEEE Intelligent Transportation Systems Society Conference(ITSC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuya Ishiguro, Takuma Yamaguchi, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Model Predictive Collision Avoidance for Non-Convex Environment Using Projected C-Space
3. 学会等名 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mizuho Aoki, Kohei Honda, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki, Akira Ito, Daisuke Nagasaka
2. 発表標題 Obstacle Avoidance Control Based on Nonlinear MPC for All Wheel Driven In-Wheel EV in Steering Failure
3. 学会等名 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohei Honda, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki, Akira Ito
2. 発表標題 MPC Builder for Autonomous Drive:Automatic Generation of MPCs for Motion Planning and Control
3. 学会等名 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (Accepted) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ching Lin Kuan, Kohei Honda, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Multi-Horizon and Multi-Rate Model Predictive Control for Integrated Longitudinal and Lateral Vehicle Control
3. 学会等名 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (Accepted) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本田 康平, 奥田 裕之, 鈴木 達也, 伊藤 章
2. 発表標題 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
3. 学会等名 計測自動制御学会第10回制御部門マルチシンポジウム(MSCS2023)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 移動体の制御装置	発明者 伊藤章, 鈴木達也, 奥田裕之, 本田康平	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-158118	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 移動体、移動制御方法、および、コンピュータプログラム	発明者 奥田裕之, ムラリード ハララン, ほ か2名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-118391	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究協力者	本田 康平 (HONDA KOHEI)	名古屋大学・工学研究科・博士後期課程学生 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	鈴木 達也 (SUZUKI TATSUYA)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	

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