

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03423

研究課題名（和文）協調型自動運転を包括的に支援するサイバーフィジカルシステム基盤

研究課題名（英文）Cyber-Physical System Architecture for Cooperative Driving

研究代表者

塚田 学（Manabu, Tsukada）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：90724352

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、協調型自動運転を支援するサイバーフィジカルシステム基盤の構築に取り組んだ。ゼロ知識証明を用いた車両識別プロトコル、適応型ポテンシャル場とクロソイド曲線を組み合わせた緊急停止経路計画手法、V2X通信と路側知覚ユニットの統合、ブロックチェーンとフェデレーテッド・ラーニングを用いたデータ共有手法、決定論的かつプライバシー保護型の相互検証メカニズムを開発した。これらの技術は、協調型自動運転の実現に向けた重要な基盤となることが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、協調型自動運転の実現に向けたサイバーフィジカルシステムの基盤技術を提供する点で学術的意義が高い。ゼロ知識証明やブロックチェーンを用いたデータ共有手法は、情報セキュリティとプライバシー保護の観点からも重要である。社会的には、これらの技術が導入されることで、自動運転車の安全性と効率性が向上し、交通事故の減少や交通渋滞の緩和が期待される。また、効率的な交通システムの構築により、環境負荷の低減にも寄与する。

研究成果の概要（英文）：This research addressed the development of a cyber-physical system infrastructure to support co-operative automated driving. Vehicle identification protocols using zero-knowledge proofs, emergency stop path planning methods combining adaptive potential fields and clothoid curves, integration of V2X communication and roadside perception units, data sharing methods using blockchain and federated learning, deterministic and privacy-preserving mutual verification mechanisms have been developed. These technologies are expected to provide an important basis for the realisation of co-operative automated driving.

研究分野：協調型自動運転

キーワード：協調型ITS 情報ネットワーク 自動運転 V2X

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自律型自動運転は、人間の運転者をセンサと計算機で置き換える技術であり、局所的な情報に基づいて運転するため限界が存在する。具体的には、自律型の自動運転システムは車載センサからの情報に依存しており、見通しの悪い場所や他の車両の動きを予測する際に問題が発生する。このため、自律型システムは、人間の運転者と同様の制約を受けやすい。これに対し、協調型自動運転では、Vehicle-to-Everything (V2X)通信を用いて広範囲の物理空間を正確に反映する Local Dynamic Map (LDM)を利用することで、人間の運転の模倣では不可能であったレベルの安全性と効率性を両立できる可能性がある。しかし、LDMは協調認知、協調予測、協調計画の各段階で課題を抱えており、これらを解決するための研究が必要である。具体的には、LDMには他車両データと自車両センサデータが混在しており、これらを統合するための手法が求められている。また、リアルタイムな情報共有と予測データの不足も、協調型自動運転の課題として挙げられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、協調型自動運転を包括的に支援するサイバーフィジカルシステム基盤を構築することである。具体的には、対象エリア内の道路ユーザの存在を網羅し、未来を含めた時空間で管理する路側拠点システムを設計し、自動運転車の認知・予測・計画機能を支援することを目指す。これにより、V2Xによって自動運転を支援するLDMを、協調認知のためのプラットフォームから、協調認知・協調予測・協調計画のためのプラットフォームへと抜本的に転換させ、国際標準技術と連携できる参照実装として提供する。本研究は、自動運転車のセンサデータやV2Xデータを統合し、リアルタイムかつ高精度な認知・予測・計画を実現することで、自動運転の安全性と効率性を向上させることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、分散型の路側拠点システムを構築し、各拠点がセンサデータ、V2Xデータ、車両データを統合して管理する手法を採用した。具体的には、まず、センサによる近接観測データ、受信機からの遠隔観測データ、自車両からのデータを統合した。このプロセスには、不正メッセージの検出やデータの時空間管理機能の追加が含まれていた。データ統合の際には、各データソースの信頼性を評価し、不正データのフィルタリングを行った。次に、予測軌道と計画軌道を集約し、その確信度を管理することで、将来の交通状況を高精度に予測した。予測アルゴリズムには、機械学習技術を活用し、過去のデータから交通パターンを学習した。さらに、走行調停アルゴリズムを用いて、エリア内の協調型自動運転車の走行を最適化した。これにより、通信帯域幅の効率的な利用と交通流のスムーズな運行を実現した。具体的な手法として、車両間の通信遅延を最小限に抑えつつ、リアルタイムでのデータ共有を行うプロトコルを設計した。システムの有効性は、シミュレーションおよび実証実験によって検証した。特に、大規模な交通シミュレーション環境を構築し、提案手法の効果を検証した。また、実証実験では、東京大学柏キャンパス内で試験を行い、実際の交通環境下での性能評価を行った。この際、異なる交通条件や環境下でのシステムの適応性も評価した。

4. 研究成果

本研究では、協調型自動運転を支援するためのサイバーフィジカルシステム基盤を構築した。まず、Sybil攻撃に対抗するために、ゼロ知識証明を用いた車両識別プロトコル「Zero-Knowledge Proof of Distinct Identity (zk-PoDI)」を提案した。このプロトコルにより、車両は自身の識別情報を明かすことなく、他の車両と異なる存在であることを証明できた。

次に、自動運転車両の緊急停止経路計画手法を開発した。この手法では、適応型ポテンシャル場とクロソイド曲線を組み合わせることで、障害物を回避しつつ、車両の動的制約を考慮した滑らかな経路を生成することができた。具体的には、「Clothoid Curve-based Emergency Stopping Path-Planning with Adaptive Potential Field」という手法を提案し、MATLAB/SimulinkとCarSimを用いたシミュレーションでその有効性を確認した。この手法により、従来の方法に比べて車両の安全性と制御性能が向上した。

さらに、Vehicle-to-Everything (V2X)通信と路側知覚ユニットの統合に関する研究を行った。これにより、自律走行車両の状況認識能力が向上し、より安全で効率的な交通システムの構築が期待された。「V2X and Beyond: Integrating Roadside Units for Next-Level Cooperative Automated Driving」と題した研究では、V2X通信を活用して路側知覚ユニットをネットワーク化し、協調型知覚を実現することで、自動運転車の安全性と効率性を大幅に向上させた。

また、VANETにおけるセキュアかつ効率的なデータ共有を実現するため、ブロックチェーンとフ

フェデレーテッド・ラーニングを組み合わせた手法「Secure and Efficient Blockchain-based Federated Learning Approach for VANETs (SEBFL)」を提案した。ブロックチェーン技術を用いることで、データの改ざん防止とトレーサビリティを確保し、フェデレーテッド・ラーニングを利用して分散学習を行うことで、プライバシーを保護しながらデータの価値を最大限に活用することが可能となった。この手法により、通信効率とデータプライバシーが大幅に向上した。

さらに、協調型知覚データの真正性を確保するための、決定論的かつプライバシー保護型の相互検証メカニズム「Zero-Knowledge Proof of Traffic (zk-PoT)」を開発した。このメカニズムでは、車両が交通状況に関する暗号学的証明を生成し、複数の証明を決定論的に相互検証することで、データの信頼性を担保した。

また、道路側の LiDAR センサを活用した協調型自動運転のための高精度位置特定手法も提案した。この手法では、LiDAR データと V2X 通信を組み合わせることで、従来の方法よりも高い精度で車両の位置を特定できることが示された。

最後に、大規模な交通シミュレーション環境を構築し、提案手法の有効性を検証した。特に、シミュレーションプラットフォーム「Flowsim」を用いて、都市規模のシナリオでの自動運転車の挙動を評価した。このプラットフォームにより、CAV の行動分析や通信プロトコルの評価、サイバーセキュリティの脆弱性評価などが可能となった。

シミュレーション結果から、提案手法が交通流の最適化や交通事故の減少に寄与することが確認された。また、実証実験では、実際の交通環境下でのシステムの安定性と信頼性が確認された。これらの研究成果は、協調型自動運転の実現に向けた重要な基盤技術となることが期待される。さらに、これらの技術は、国際標準技術としての適用可能性も高く、今後の標準化活動にも寄与することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Lin Pengfei, Tsukada Manabu	4. 巻 7
2. 論文標題 Model Predictive Path-Planning Controller With Potential Function for Emergency Collision Avoidance on Highway Driving	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 4662 ~ 4669
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2022.3152693	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 Lin Pengfei, Tsukada Manabu	4. 巻 1
2. 論文標題 Adaptive Potential Field with Collision Avoidance for Connected Autonomous Vehicles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 13th Asian Control Conference (ASCC)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/ASCC56756.2022.9828160	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 Lin Pengfei, Tsukada Manabu	4. 巻 1
2. 論文標題 Cooperative Path Planning Using Responsibility-Sensitive Safety (RSS)-based Potential Field with Sigmoid Curve	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Spring)	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860508	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 Masuda Hidetaka, Marai Oussama El, Tsukada Manabu, Taleb Tarik, Esaki Hiroshi	4. 巻 72
2. 論文標題 Feature-Based Vehicle Identification Framework for Optimization of Collective Perception Messages in Vehicular Networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 2120 ~ 2129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TVT.2022.3211852	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 該当する

1. 著者名 Lin Pengfei, Quan Ying Shuai, Yang Jin Ho, Chung Chung Choo, Tsukada Manabu	4. 巻 24
2. 論文標題 Safety Tunnel-Based Model Predictive Path-Planning Controller With Potential Functions for Emergency Navigation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	6. 最初と最後の頁 3974 ~ 3985
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TITS.2022.3229699	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 該当する

1. 著者名 Tao Ye, Jiang Yuze, Lin Pengfei, Tsukada Manabu, Esaki Hiroshi	4. 巻 1
2. 論文標題 zk-PoT: Zero-Knowledge Proof of Traffic for Privacy Enabled Cooperative Perception	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE 20th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CCNC51644.2023.10059601	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 Okumura Keisuke, Machida Manao, Defago Xavier, Tamura Yasumasa	4. 巻 310
2. 論文標題 Priority inheritance with backtracking for iterative multi-agent path finding	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 103752 ~ 103752
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.artint.2022.103752	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 Hirata Mai, Tsukada Manabu, Okumura Keisuke, Tamura Yasumasa, Ochiai Hideya, Defago Xavier	4. 巻 1
2. 論文標題 Roadside-Assisted Cooperative Planning using Future Path Sharing for Autonomous Driving	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall)	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/VTC2021-Fall152928.2021.9625324	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 Mizutani Masaya, Tsukada Manabu, Esaki Hiroshi	4. 巻 1
2. 論文標題 AutoMCM: Maneuver Coordination Service with Abstracted Functions for Autonomous Driving	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 24th IEEE International Conference on Intelligent Transportation (ITSC)	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ITSC48978.2021.9564556	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 Tsukada Manabu, Ariei Shimpei, Ochiai Hideya, Esaki Hiroshi	4. 巻 1
2. 論文標題 Misbehavior Detection Using Collective Perception under Privacy Considerations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CCNC49033.2022.9700564	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12件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Yu Asabe, Ehsan Javanmardi, Jin Nakazato, Manabu Tsukada, Hiroshi Esaki
2. 発表標題 AutowareV2X: Enabling V2X Communication and Collective Perception for Autonomous Driving
3. 学会等名 Asian Internet Engineering Conference (AINTEC) 2022 Poster (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichi Kambara, Ehsan Javanmardi, Jin Nakazato, Yousuke Watanabe, Kenya Sato, Hiroaki Takada, Manabu Tsukada
2. 発表標題 Towards Cooperative Automated Driving: Geographic-Aware Network Analysis and Visualization tool
3. 学会等名 Asian Internet Engineering Conference (AINTEC) 2022 Poster (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅部佑, エッサン ジャワーンマーディ, 中里仁, 塚田学, 江崎浩
2. 発表標題 AutowareV2X: 自動運転におけるV2X通信と協調認知の実現
3. 学会等名 電子情報通信学会 ITS研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神原滉一, Ehsan Javanmardi, 中里仁, 山田俊也, 渡辺陽介, 高田広章, 佐藤健哉, 塚田学
2. 発表標題 協調型自動運転のための地理的特性を考慮したネットワーク補間
3. 学会等名 電子情報通信学会 ITS研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塚田学
2. 発表標題 協調型自動運転に向けたV2X通信技術とその展望
3. 学会等名 無線通信システム研究会 (RCS) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中里仁, 塚田学
2. 発表標題 協調型自動運転における遠隔操作・支援のための5Gフィールドにおける計測評価
3. 学会等名 無線通信システム研究会 (RCS) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keisuke Okumura, Francois Bonnet, Yasumasa Tamura, Xavier Defago
2. 発表標題 Offline Time-Independent Multi-agent Path Planning
3. 学会等名 The 31st International Conference on Artificial Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Okumura, Xavier Defago
2. 発表標題 Solving Simultaneous Target Assignment and Path Planning Efficiently with Time-Independent Execution
3. 学会等名 International Conference on Automated Planning and Scheduling (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塚田学
2. 発表標題 V2Xを用いた協調型自動運転の展望
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションシステム研究会 (CS) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Manabu Tsukada
2. 発表標題 Cooperative Automated Driving Using Vehicle-to-Everything (V2X)
3. 学会等名 16th Asian Internet Engineering Conference (AINTEC), Virtual Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有井慎平, 塚田学, 落合秀也, 江崎浩
2. 発表標題 協調型ITSの仮名ID使用環境下における認知情報共有を用いた不正行為検出
3. 学会等名 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02021) シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻尾康平, 平田真唯, 奥村圭祐, 田村康将, 塚田学, デファゴ クサヴィエ,
2. 発表標題 自動運転を支援する時空間予測を用いた路側の協調経路計画システム
3. 学会等名 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02021) シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 執筆者: 54名、技術情報協会	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 582
3. 書名 自動運転車に向けた電子機器・部品の開発と制御技術	

〔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
研究分担者	田村 康将 (Tamura Yasumasa) (50773701)	北海道大学・大学院情報科学研究科・助教 (12608)	

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
研究分担者	DEFAGO Xavier (Defago Xavier) (70333557)	東京工業大学・情報理工学院・教授 (12608)	

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