

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17734

研究課題名（和文）多様な通信環境に動的適応する車両通信向け協調学習基盤

研究課題名（英文）Adaptive Cooperative Learning for Spatio-Temporal Environmental Variation in Vehicular Communications

研究代表者

田谷 昭仁（Akihito, Taya）

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：10867948

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）：無線通信技術が広く普及し、自動車にも通信機能を搭載するコネクテッドカーに期待が高まっている。自動車の通信では、安全性の観点から高信頼かつ低遅延であることが求められ、その実現のためには電波伝搬や混雑度など環境に合わせた通信制御が必要である。本研究では車両が環境を機械学習により学習する際に、自律分散的に他車両と強調しながら学習する手法として、フェデレーテッドラーニングと呼ばれる手法を元に分散的かつ学習時の通信量を削減可能なアルゴリズムを開発した。また、空間依存性のある通信環境について、未知の地域での通信特性を学習済みの地域のモデルから予測する手法も考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した分散機械学習手法は従来手法とは異なり、ニューラルネットワークのパラメータを車両間で共有しながら共通のパラメータに収束させるのではなく、異なるパラメータであっても同一入力に対して同一出力すれば同じ予測モデルであるという考えのもと、関数そのものを最適化対象とすることが特徴である。この手法の考案にあたり、数値を収束させるのではなく、関数である予測モデルを収束させるという発想の転換があり、今後の分散機械学習の発展への貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：Developing connected cars equipped with communication functions is essential for autonomous driving. In automotive communication, high reliability and low latency are required for safety, and to achieve this, communication control tailored to the environment, such as radio wave propagation and congestion, is necessary. In this study, we developed an algorithm that reduces the amount of communication needed during decentralized machine learning by vehicles when learning the environment. We also extended a method to predict the communication characteristics in an unknown area from the model of the learned area for a communication environment with spatial dependence.

研究分野：情報通信

キーワード：車車間通信 分散協調学習 Federated Learning 環境適応

### 1. 研究開始当初の背景

コネクテッドカーと呼ばれる無線通信機能を備えた自動車が普及することで、遠くの交通道路情報を取得したり、周囲の車両と運転情報を共有したりすることで、渋滞緩和や交通整備が行える。また、さらに近年の自動車には車載カメラをはじめとして、レーダーなど多くのセンサが搭載されており、これらのセンサデータを周囲の車両と共有して、認識可能な範囲を広げるなど、自動運転への応用にも期待できる。

このような自動車向け無線通信では、安全性の観点から高信頼かつ低遅延であることが求められ、その実現のためには電波伝搬や混雑度など環境に合わせた通信制御が必須である。しかし、高速で遠距離を移動する車両は環境の変化にさらされるため、制御手法そのものを環境に合わせて変化させることが求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、環境ごとに異なる制御手法を最適化するために、車両に搭載されたセンサによって膨大なデータを使って、データ分析や機械学習を行う手法の考案を目的とする。機械学習に使用するデータをすべて1か所のサーバに集めることは通信帯域を圧迫するため、現実的ではなく、また、スケーラビリティにも課題が残る。そこで、本研究では、サーバを用いず車両同士が直接通信を行い分散学習する手法および、エッジコンピューティングを用いて地域ごとに個別に学習を行う仕組みを考える。並行して、エッジコンピューティングで通信品質のデータ分析を行う際に、エッジサーバがなく分析ができない地域の品質を、分析済みの地域の品質から推定する手法を考案する。

### 3. 研究の方法

本研究では車両が主体的に分散機械学習を行うしくみとして、連合学習を採用した。その際、通常の連合学習とは異なり、管理サーバを使用せず、車両同士が直接学習モデルを交換するアルゴリズムを提案した。機械学習では通常大量のデータを集めて1つの計算機で学習を行うが、車両に搭載されるセンサデータは膨大な量となり、すべてをサーバにアップロードすると通信帯域を圧迫してしまう。また、データにはプライバシー情報が含まれていることもあり、サーバへアップロードすることが問題になることもある。そこで、提案手法ではデータをサーバへアップロードせず、各車両が個別に機械学習を行い、学習結果を共有することで、分散学習を行うこととした。また、地域ごとの学習ではそれぞれ、エッジサーバ間で学習モデルを合成することで、推論性能を向上させるシステムを考案した。さらに、通信品質予測では、ベイズ推定を用いることで、地域ごとにミリ波通信のスループットの確率分布を求めたのち、データを取得できない地域での確率分布を、距離を考慮した内挿により求める手法を提案した。

### 4. 研究成果

#### (1) サーバを使用しない連合学習

特に、モデルのパラメータを直接共有する場合に通信量が多くなる問題を解決するため、知識蒸留を用いたモデル合成手法を提案した。提案手法では、学習モデルを関数空間上のベクトルとして扱うことで、パラメータの合成では非凸最適化問題だった分散学習の問題を凸最適化問題とみなせることに着目し、安定した学習が可能である(図1)。提案手法では特に、学習を担う車両同士の結合が疎であるときに、パラメータ合成に対する優位性がある。

また、学習モデルが関数空間上で提案手法により学習する過程を可視化する手法も提案した(図2)。

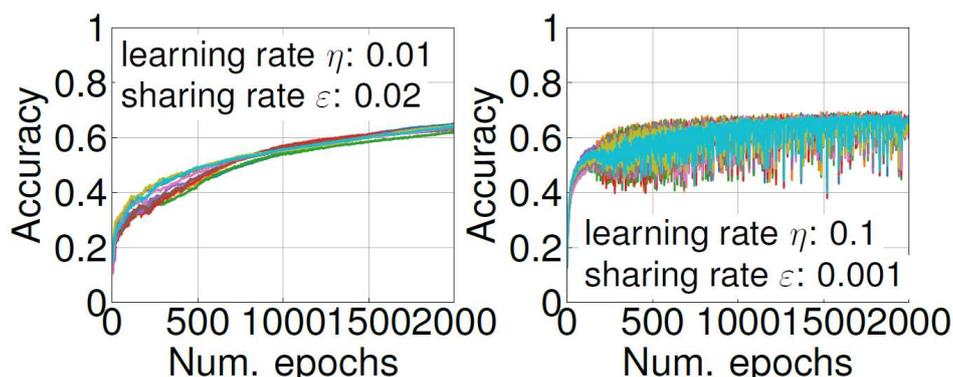


図1. 提案手法(左図)とパラメータ合成(右図)のCIFAR10学習性能の比較

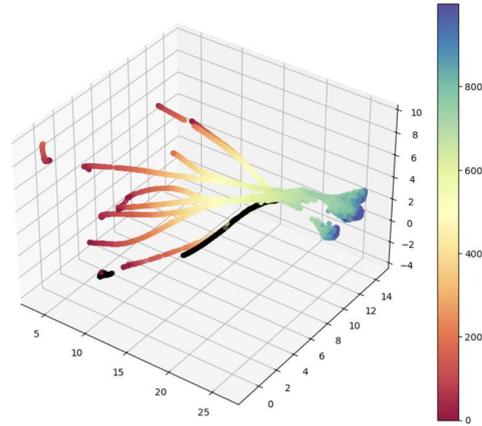


図 2. 関数空間内での 10 台の端末が分散学習した時の学習モデルの収束の様子

### (2) 連合学習におけるエッジサーバ間の学習モデル合成

本研究では車両が移動しながら近隣車両と連合学習を行うことを考える。ここではエッジサーバが点在している環境を想定し、エッジサーバを中心とした連合学習を行う。エッジサーバごとにその周辺の特徴を反映したモデルが学習できるが、共通する特徴の学習による高速化や汎用的なモデル学習のために、定期的なエッジサーバ同士で学習モデルを共有して合成することが必要である。本研究成果では、2つのエッジサーバが連合学習を行いつつ、一定間隔で、エッジサーバ間で学習モデルをパラメータの平均化による合成をしたときの学習性能を調査した。図 3 は CIFAR100 の連合学習において、20 エポックごとにモデルを合成したときの学習の様子を示している。学習初期段階では、合成時(20, 40 エポック)に推論能力の低下が見られるが、学習が進むにつれて、合成が推論性能の向上に寄与することを確認できた。この結果から領域ごとに連合学習するだけでなく、領域間でモデル合成を定期的に行う利点が示された。

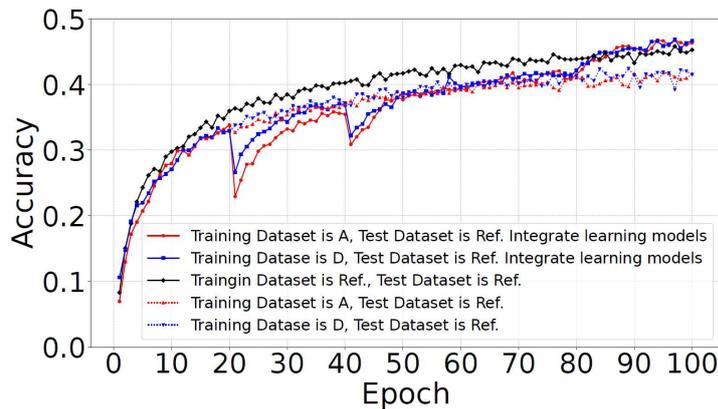


図 3. 連合学習の途中でエッジサーバ間でモデルを合成した時の学習の様子

### (3) ミリ波通信の通信品質分布予測

環境ごとに異なるミリ波通信品質の予測手法を提案した。ミリ波帯電波を使うと高速な通信が可能になるが、遮蔽物により電波が減衰し、通信速度が下がる性質がある。そのため車車間通信においては、遠くの車両と通信する際に、送受信車両の間に別の車両が入ることで、通信速度が大きく変わる。その結果、道路の混雑度合いに応じてミリ波通信の品質が変化する。本研究では、図 4 に示すような、道路によって混雑度が異なる環境を考えた。RSU (Road Side Unit) にエッジサーバが設置されていると仮定した。RSU の周辺ではデータ取得が可能であり、バイズ推定を用いてその区域でのスループットの確率分布を求めることができるが、RSU がない区域ではデー

タ収集ができず分布の計算ができない。そこで、提案手法では、RSU がない区域のスループットを、計算で得た確率分布から推定するため、RSU のある区域で求めたスループット分布から距離を考慮して内挿した。シミュレーションによる評価を行い提案手法により 11%程度の誤差でスループットの平均値を推定できることを示した。

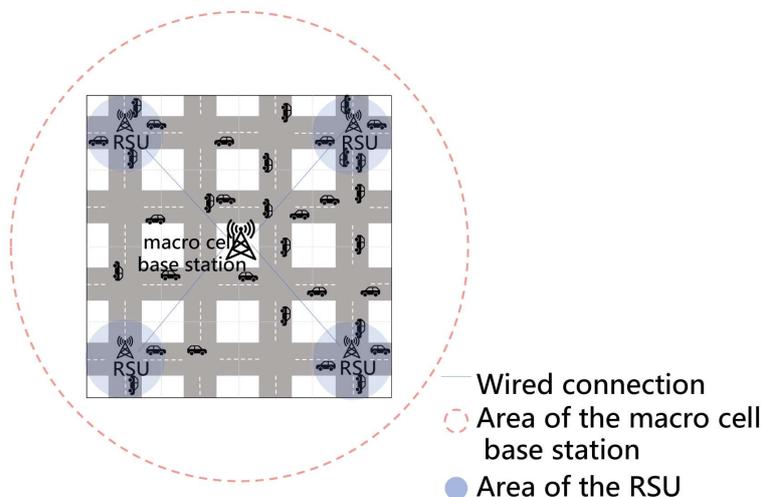


図 4. 混雑度の異なる区域でのミリ波通信品質予測の概要

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 Taya Akihito, Nishio Takayuki, Morikura Masahiro, Yamamoto Koji	4. 巻 8
2. 論文標題 Decentralized and Model-Free Federated Learning: Consensus-Based Distillation in Function Space	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks	6. 最初と最後の頁 799 ~ 814
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TSIPN.2022.3205549	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13件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Akihito Taya
2. 発表標題 Implementation-Agnostic Framework for Analysis of Environment-Dependent Relations
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihito Taya
2. 発表標題 Distillation-based serverless federated learning over sensor networks
3. 学会等名 2022 International Conference on Emerging Technologies for Communications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihito Taya
2. 発表標題 Federated learning: privacy-preserving distributed machine learning in IoT
3. 学会等名 Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 窪田諒我, 田谷昭仁, 戸辺義人
2. 発表標題 回転式LiDARの2次元点群のためのノンパラメトリック線分近似
3. 学会等名 電子情報通信学会SeMI研究会 IEICE-SeMI2022-49
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 紅林勇陽, 田谷昭仁, 戸辺義人
2. 発表標題 エッジコンピューティングによる環境依存するミリ波帯V2V通信品質の予測手法
3. 学会等名 情報処理学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 窪田諒我, 紅林勇陽, 田谷昭仁, 戸辺義人
2. 発表標題 2次元固定LiDARの点群データの線分近似表現による移動物体軌跡の視覚化
3. 学会等名 情報処理学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野翔多, 山崎託, 三好匠, 田谷昭仁, 西山勇毅, 瀬崎薫
2. 発表標題 エッジ連合学習における端末の移動を考慮したパラメータ集約のタイミング制御
3. 学会等名 電子情報通信学会SeMI研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuhi Kurebayashi, Akihito Taya, and Yoshito Tobe
2. 発表標題 Environment-Dependent Throughput Distribution Estimation Based on Bayesian Approach for mmWave Vehicular Communications
3. 学会等名 The 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference: VTC2023-Spring (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下優衣, 田谷昭仁, 戸辺義人
2. 発表標題 計算資源の限られた小型センサ端末のための勾配ブースティング連合学習
3. 学会等名 第29回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shota Ono, Taku Yamazaki, Takumi Miyoshi, Akihito Taya, Yuuki Nishiyama, and Kaoru Sezaki
2. 発表標題 Experimental Evaluation Toward Mobility-Driven Model Integration Between Edges
3. 学会等名 the 21st Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Akihito Taya, Yuuki Nishiyama, and Kaoru Sezaki
2. 発表標題 "Convergence visualizer of decentralized federated distillation with reduced communication costs
3. 学会等名 IEEE Global Communications 2023 (GLOBECOM) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野翔多, 山崎託, 三好匠, 田谷昭仁, 西山勇毅, 瀬崎薫
2. 発表標題 ユーザの移動性を活用した地域連携型連合学習における学習モデル統合手法の評価
3. 学会等名 第31回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野翔多, 山崎託, 三好匠, 田谷昭仁, 西山勇毅, 瀬崎薫
2. 発表標題 連合学習におけるスマートフォンの電力消費量の調査
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023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