

デジタルツインでモビリティ群を賢く制御する

～分散深層学習がもたらす未来の可能性～

Smart traffic coordination via digital twins – A future concept of distributed deep learning –



協創情報研究部 知能創発環境研究グループ

丹羽 健太

Kenta Niwa

●プロフィール

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 協創情報研究部 知能創発環境研究グループ 特別研究員、コンピュータ&データサイエンス研究所 兼務。2008年名古屋大学大学院修士課程修了。同年、NTTに入社。2014年名古屋大学大学院博士課程修了。博士(情報科学)。入社より音響信号処理(主にマイクロホンアレイ信号処理)の研究に従事。2017-2018年 Victoria University of Wellington客員研究員。分散最適化(機械学習の一分野)の研究に興味を持ち、ネットワークを介した集合知形成の研究に従事。IEEEシニアメンバー。

スマートフォンやスマートスピーカーを通じた音声による情報操作等の機械学習の恩恵を一般の人が利用することが当たり前になってきました。次世代の機械学習に関する大きなイノベーションの可能性として、「個」ではなく、通信で連結された「群」を協調して制御/推論することで大規模な系(例えば街全体)を最適化したり、分散蓄積されたデータから集合

知を形成することが期待されています。本講演では、私たちNTT・CS研が行ってきた学習可能なデジタルツインを介してモビリティ群を賢く制御する研究について報告します。

(1)シグナルフリーモビリティ プロジェクト

将来、ICTの高度化により、ヒト・クルマ・インフラが高度に協調し、安全・効率的な移動を提供する高度協調型モビリティ社会の実現が期待されています。IOWN構想により究極に高度化されたICTがもたらすモビリティ社会のコンセプトとして、2019年12月に無信号の交通調整(シグナルフリーモビリティ)についてコンセプト動画(Mobility by IOWN)が公開されています[1, 2]。シグナルフリーモビリティの実現に向けた第一歩として、私たちは、車が衝突せずに、移動・輸送時間を限界まで短縮するための分散制御/推論問題に取り組んでいます[3]。

シグナルフリーモビリティを構成する技術について、図1を用いて概説します。まず、実際の車の代わりに小型実車群を用いて、ミニチュア実世界にシグナルフリーモビリティを体現することを目標としています。図1(左下)に示すように、小型実

車には通信モジュール、車輪の駆動用モーター、GPS代替となる位置センサー、演算用小型GPU等が搭載されていて、近隣の車群と通信しながら、状態(速度、位置、モーター駆動等)を逐次更新することが可能です。実世界にある車とサイバースペースにあるデジタルツインは連動し、シグナルフリーモビリティ(ぶつからずに輸送時間を極小化)を達成するための最適状態をデジタルツイン上で予測し、現実世界にフィードバックします。

デジタルツインを構成する演算の一つとして、状態の逐次更新処理があります。例えば、車の状態の更新は、近接した車群だけではなく、道路との相互作用によって決まります。例えば、交差点の通過優先順位、車速規制の順守等が含まれます。なお、サイバースペースにある車や道路は、必ずしも実世界の模倣に限定されるわけではありません。実世界には存在しない仮想道路(図1右上)を構築し、多様な道路環境で、車の台数や初期位置などを変えて、あたかも走行したかのようなデータ系列を取得することが可能です。この大量かつ多様なデータを使って学習することにより、効率的に汎化性の高い運転制御モデルを得ることができるでしょう。学習されたモデルを通じて、実世界へフィードバックすることで、大規模かつ高精度な交通制御を可能にします。

サイバースペース上で、デジタルツインの状態変数を時間発展させることで、交通シミュレーションを実施できます。このシミュレーションは、ニューラルネットワークを用いて表現することが可能です。図1(右下)に示すように、具体的には、(i)各車の状態変数更新、(ii)近接車間の通信による衝突防止トークンの交換、(iii)入力画像や衝突防止パラメータの更新を交互に繰り返す、という処理で構成されています[3]。図1(右下)の各方形の幅が車の台数、奥行きが時間(更新回数)に対応する巨大なリカレントニューラルネットワーク(RNN)ですが、演

算の分散並列性が高く、リアルタイムに状態変数を更新することができます。車群が衝突しないような制約を状態変数に課しながら、平均速度を向上する運転制御モデルを学習しています。なお、詳細は研究展示[4]にて紹介しますが、学習可能なデジタルツインを介した集合知形成により、初期状態(ランダム値でモデル化)と比較して約30%の平均速度の向上を実現することを確認しています。

(2)非同期分散型の連合学習 プロジェクト

シグナルフリーモビリティでは、シミュレーションで得られたデータを1つのサーバー上に集約して運転制御モデルの学習を行っていました。しかし、今後、ヒトやモノのデジタルツインを介して全体の系を協調していく世界では、データを一か所に集約するのではなく、デジタルツインごとに分散蓄積されたデータを用いて補助情報(トークン)を交換するだけで、集合知が形成される未来になるでしょう。

ノード数やエッジ数(デジタルツインの数やそれらの通信接続数)が大きく、巨大なネットワークグラフで演算が行われることを想定して、非同期分散型の連合学習の研究を進めています。従来研究では、接続しているノード間でモデル変数を交換して平均化しながら合意形成をとる連合学習則[5,6]が多用されていますが、私たちが提案した方法[7,8]は、(i)非同期分散通信を許容でき、(ii)計算サーバー間のモデルの合意形成に関する制約を課すなど、計算サーバー間の統計的なデータの偏りに耐性のあるアルゴリズムを構築したことが特徴です。

今後、基盤となる数理をさらに発展させるとともに、応用事例(交通網、エネルギー網、物流網など)を増やし、群全体の最適制御によるデジタルツインコンピューティング社会の早期実現に貢献します。

●参考文献

- [1] IONWコンセプトビデオ, "Mobility by IOWN", https://www.youtube.com/watch?v=4fo_kEYrY6E
- [2] Digital twin computing white paper (ver. 2.0.0), https://www.rd.ntt/dtc/DTC_Whitepaper_jp_2_0_0.pdf, 2019.
- [3] K. Niwa, N. Ueda, H. Sawada, A. Fujino, S. Takeda, B. Kleijn, and G. Zhang, "CoordiNet: Constrained dynamics learning for state coordination over graph," in *Proc. the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (KDD 2022)*, (under review).
- [4] 丹羽 健太, "信号機を使わないリアルタイム分散車流制御 ~デジタルツインを介した集合知学習技術", NTTコミュニケーション科学基礎研究所 オープンハウス2022 (展示番号01) https://www.kecl.ntt.co.jp/openhouse/2022/exhibition_01.html
- [5] J. Chen, A. H. Sayed, "Diffusion adaptation strategies for distributed optimization and learning over networks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 60, No. 8, pp. 4289-4305, 2012.
- [6] B. McMahan, E. Moore, D. Ramage, S. Hampson, B. A. y Arcas, "Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data," in *Proc. Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS 2017)*, pp. 1273-1282, 2017.
- [7] K. Niwa, N. Harada, G. Zhang, and B. Kleijn, "Edge-consensus learning: deep learning on P2P networks with nonhomogeneous data," in *Proc. the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (KDD 2020)*, pp. 668-678, 2020.
- [8] K. Niwa, G. Zhang, B. Kleijn, N. Harada, H. Sawada, and A. Fujino, "Asynchronous decentralized optimization with implicit stochastic variance reduction," in *Proc. of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML 2021)*, 2021.

