

研究終了報告書

「機械学習と社会科学の融合による社会シミュレーションの革新」

研究期間： 2021 年 10 月～ 2024 年 3 月

研究者： 山田 広明

1. 研究のねらい

シミュレーションとは、直接観測することが難しい未来のできごとや過去のできごと、あるいは反事実的な出来事を可視化することができる、科学的に重要なツールである。社会科学分野においても、社会活動を再現するシミュレーション（社会シミュレーション）の研究が、人流・交通流・ロジスティクスを対象に盛んに行われ実応用が進んでいる。社会の様々な分野における多種・膨大な情報を統合し、社会シミュレーションとして利活用できれば、既存の業務フローや合意形成プロセスの革新は飛躍的に進むはずである。

しかし、社会シミュレーションはその構築が非常に高コストであるという問題があるため、多様な問題領域に十分に展開できていないという問題がある。たとえば、社会シミュレーションの代表的なモデリング方法論である Verification, Validation, & Accreditation (VV&A)を用いる場合は、現場観察やヒアリングに基づいた人々の行動モデルの構築、エージェントシミュレーションの実装、現場専門家とのモデル評価ワークショップ、を繰り返すことでモデルの妥当性を漸進的に高めていく。しかしこれを実行するには、数名の専門家が1,2年の時間を投入する必要がある。社会シミュレーションを多様な領域に展開するためには、社会シミュレーションの新たな構築手法が必要である。

以上の問題認識に基づき、本研究では、グラフニューラルネットワークに代表される機械学習技術を用いて、データから社会シミュレーションを半自動で構築する AutoSIM フレームワークを確立することを目的とする。複雑な社会システムの振る舞いを学習することは通常の手法では困難と予想されるので、社会科学理論に代表されるドメイン知識の活用を検討する。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究の主要な成果は、自己回帰型ニューラルネットワーク(NN)を用いた社会シミュレーションのサロゲートモデリング手法を開発したことにある。具体的には、マクロスケールの人流／交通シミュレーションを自己回帰型 NN から構築する手法を開発し、実スケールおよび実データでの検証を完了した。研究を進める中で、社会科学理論に代表されるドメイン知識を活用する方法を開発し、国内外で3件の特許を出願中である。

研究開始時に想定をしていなかった展開として、開発技術の実課題への応用、その過程で明らかになった学習データ分布外での性能低下の問題(外挿の問題)への対処、が挙げられる。近年、オリンピックや万博といった大規模イベントにおいて、いかにして混雑を起こさないように交通マネジメントを行うかが社会的な関心事となっている。そこで、開発したサロゲートモデリング技術を当該課題へ適用する研究を行った。マネジメントという用途では、新奇施策の評価を行えること(What-if 分析)と、最適施策を発見できること(シミュレーション最適化)が重要である。シミュレーションを通して二つの分析を行うためには、シミュレーションが過去データの範囲外の状況もある程度の精度で再現できる必要がある。しかし、サロゲートモデルは学習データの分布外での予測

性能が非常に悪い。この外挿の問題へ対処するための研究をさらに行っている。以上の追加研究までを含めて論文としてまとめる予定である。

本研究を起点として、さまざまな研究者・産業界との連携や、研究活動の広がりが生まれた。第一に、AI シミュレーションに関心を寄せる複数の研究者との交流が生まれ、学会での招待講演などに発展した。第二に、本研究の成果を技術的な基盤にすることで、JST さきがけで新たな研究計画が採択され、本研究をさら発展させる機会を得た。第三に、期間内に社会実装には至らなかったが、さまざまな社内・社外パートナーとの連携が生み出された。第四に、本研究と関連して九州大学マス・フォア・インダストリ研究所内に寄附講座が開設された。以上の周辺活動すべてを通して、社会課題解決に挑戦するための力と信頼を養う機会を得た。

(2)詳細

研究項目 1「GNN による自動エージェントモデル構築技術の開発」

研究項目 1 の目的は、グラフニューラルネットワーク(GNN)等を用いた、社会シミュレーションのサロゲートモデル構築手法を開発することである。研究期間において、マクロスケールのサロゲートモデリング手法の開発を達成した。マクロスケールのサロゲートモデルとは、混雑のようなシステム全体の状況を再現するモデルである。対照的に、ミクロスケールのサロゲートモデルとは、個々のエージェントの動きを再現するモデルである。当初の戦略では、ミクロスケールのサロゲートモデリング研究から着手しマクロスケールの研究に発展させる予定であったが、社内連携の状況を踏まえて、技術実証を行える可能性があるマクロスケールのサロゲートモデリングの研究から着手した。その上でミクロスケールの研究へ発展させる戦略変更を行った。

研究としては、GNN のサロゲートモデリングへの適用と、社会科学理論に代表されるドメイン知識の活用方法に関する技術開発を進めた。研究成果は三件の特許として出願中である。一件は、学習データだけでなく理論とも整合する予測モデルを構築する方法についての技術である。一件は、交通状態を予測するサロゲートモデルを構築する際の特徴量構築方法についての技術である。一件は、プローブデータをデータ拡張する方法についての技術である。

研究項目 2「クロススケール手法への拡張およびカメラ画像認識データでの検証」

研究項目2の目的は、研究を拡張してミクロスケールおよびマクロスケールのサロゲートモデリング手法を確立(クロススケール手法への拡張)し、実データでの検証を完了することである。研究期間では、大阪市此花区の約 10 万人の半日の移動を再現する実験を実施し、研究項目1で開発したマクロスケールサロゲートモデリング手法が実データおよび実スケールで機能することを確認した。さらに、研究開始時に想定をしていなかった活動であるが、大規模イベントおける交通マネジメントという実課題へサロゲートモデルを応用する研究を実施した。ミクロスケールのサロゲートモデリング手法の開発については、実課題応用を試みる過程で明らかになったサロゲートモデルの外挿問題から、研究戦略の見直しが必要となり研究期間では完了しなかった。

マクロスケールサロゲートモデリング手法の実データ検証では、大阪市此花区の半日の混雑状況を再現することを目的として、携帯電話から取得された GPS データ(人口の 5%程度)と OpenStreetMap から取得した片側一車線以上の道路ネットワーク(約 1800 エッジ)を、自己回帰型グラフニューラルネットワークを用いて学習させる実験を行った(図1)。実験の結果、アーキテクチャの選択やいくつかの工夫の導入で良好な結果が得られることが分かった。なお、既に述べ

たように検証は携帯電話 GPS データで行い、カメラ画像認識データは用いなかった。なぜなら、カメラ画像認識は行動の軌跡を追跡することが技術的に難しいことが明らかになり、検証用データとしては不適と判断されたからである。

●実データ検証（実験設定）

- 大阪市此花区の約10万人の半日の移動
- 携帯電話移動データ。ユニークID数は人口の5%程度。
- OpenStreetMapから大阪市此花区の全域の、片側一車線以上の道路を抽出（約1800エッジ）

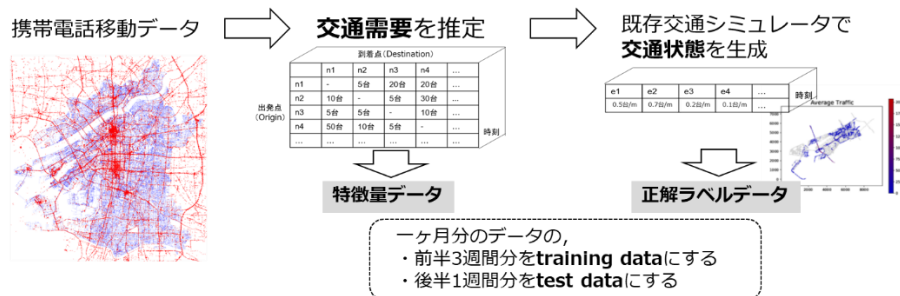


図 1 実データ検証（実験設定）

近年、オリンピックや万博といった大規模イベントにおいて、いかにして混雑を起こさないように交通マネジメントを行うかが社会的な関心事となっている。そこで、研究開始時に想定をしていなかった活動ではあるが、大規模イベントにおける交通マネジメントという実課題へサロゲートモデルを応用する研究を実施した。マネジメントという用途では、新奇施策の評価を行えること(What-if分析)と、最適施策を発見できること(シミュレーション最適化)が重要である。シミュレーションを通して二つの分析を行うためには、シミュレーションが過去データの範囲外の状況もある程度の精度で再現できる必要があるが、サロゲートモデルは学習データの分布外での予測性能が非常に悪い(外挿の問題)。そのため、通常のサロゲートモデルでは What-if 分析やシミュレーション最適化という用途に耐えない。これは、機械学習技術を用いて社会シミュレーションを構築するという目的においては、致命的な問題である。そのため、外挿の問題へ対処するための研究を追加で実施中である。以上の追加研究までを含めて論文としてまとめる計画である。

ミクロスケールのサロゲートモデル研究についても、外挿問題に対処する必要があると明らかなにあるため、研究戦略の見直しを行った。研究開始以降に、類似の研究成果が発表をされていることを確認したが、外挿問題への対処は十分に行われていないこともまた確認したので、外挿問題への対処方法に焦点を絞った研究を実施中である。

3. 今後の展開

研究期間内に社会実装には至らなかったが、さまざまな社内・社外パートナーとの連携が生み出された。本研究の成果は、研究面に関しては新たに採択された JST さきがけ課題(3.5 年間)を中心に発展させる予定である。さきがけ課題では、意思決定支援技術という視点から、シミュレーション技術に限らない総合的な枠組みを開発する。その中で、実課題の中での実証実験にも挑む予定である。研究成果の社会実装については、社内・社外パートナーとの連携を加速させ、技術の一部あるいは全部を 1.2 年以内に実証実験の俎上に載せる予定である。深層学習技術ベースの手法は外挿問題や多量のデータが必要という課題があり、従来のシミュレーション手法を完全に代替することは難しいことが明らかになったので、従来のモデルファーストな方法を補完する位置づけでの実応用を目指す。

4. 自己評価

科学技術イノベーションにつながる新しい価値の創造を目指した研究という視点から、本研究は、研究期間内に十分な成果を得たと考える。研究目的の達成状況については、一部未達であるが、実課題適用に関する追加研究を行い、新たな課題を見いだす成果も得た。また新たな課題については対処法を研究中である。研究の進め方についても、体制および予算執行について大きな問題は生じなかった。研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果については、AI シミュレーション研究者とのネットワーキングが進み、所属企業が九州大に寄附講座を設置する動きに繋がった。さらに JST さきがけ研究としても採択されるなど期待を寄せられており、社会や研究分野への十分な波及効果が生み出されつつある。一方で、研究期間内に成果を論文としてまとめられなかった点は残念であった。研究の過程で明らかになった課題への対処法も含めて、次年度中に論文としてまとめる計画である。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 0件

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 3 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

1	発 明 者	山田広明, 大石裕介
	発 明 の 名 称	エージェントモデル構築プログラム、エージェントモデル構築方法および情報処理装置
	出 願 人	富士通, JST企
	出 願 日	2021/12/01
	出 願 番 号	2021-195394(JP)、17/947870(US)、22196068.5(EP)
	概 要	学習データだけでなく理論とも整合する予測モデルを構築する方法についての技術。

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表

- THEORY-GUIDED NEURAL NETWORK FOR AGENT-BASED MODELING AND SIMULATION, Hiroaki Yamada, Shohei Yamane, 2022 Winter Simulation Conference, 2022/12/11 (ポスター)
- 社会シミュレーションと機械学習の融合, 山田広明, 2023 年電子情報通信学会総合大会, 2023/03/09 (招待講演)
- 社会シミュレーションの地平を切り開く機械学習, 山田広明, 山根昇平, 神山直之, 2023 年度人工知能学会全国大会, 2023/06/06 (ポスター)
- Advancing Social Simulation by Fusing with Machine Learning, Hiroaki Yamada, Forum "Math-for-Industry" (FMFI) 2023, 2023/08/29 (招待講演)
- 自己回帰型 NN を用いた社会シミュレーションのサロゲートモデリング, 山田広明, 第 69 回産総研 AIRC 人工知能セミナー, 2023/09/14 (招待講演)

著作物

- 社会シミュレーションとその担い手、喜多 一, 市川 学, 後藤 裕介, 山田 広明, 吉田 孝志, 嶋田 佳明、計測と制御, 2023/01/01 (総説)