

氏名 (本籍地)	西田 遼 (宮城県)
学位の種類	博士 (情報科学)
学位記番号	情博第801号
学位授与年月日	令和5年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科 (博士課程) システム情報科学 専攻
学位論文題目	Modeling, Simulation, and Optimization for Human-Centered Mobility Service and Crowd Management (人・ユーザー中心の移動サービスと群集マネジメントのためのモデリング, シミュレーションと最適化)
論文審査委員	(主査) 東北大学教授 橋本 浩一 東北大学教授 岡谷 貴之 東北大学教授 井料 隆雅 東北大学准教授 原 祐輔

## 論文内容の要旨

### 第1章 序論

移動サービスの設計や群集移動のマネジメントを進めるために、シミュレーションを活用することができる。具体的なプロセスは、仮想空間上で実際の移動をモデル化し、シミュレーションを用いて様々な状況を分析し、より良い移動のためにサービスや施策を最適化し、実世界の移動を改善するためのフィードバック情報を提供する、というものである。本研究の目的は、移動のモデル化、シミュレーション、最適化の各プロセスを研究することで、シミュレーションに基づく移動の設計およびマネジメントを推進することである。特に、より人間・ユーザーの視点を重視した研究を行うことで、より高度で人間中心のモビリティサービスや群集マネジメントに貢献することを目指す。

本論文では、モデリング、シミュレーション、最適化の順で研究を記述している。モデリングの研究は第2章、第3章、第4章からなり、実データから人々の選択行動の特徴を理解し、モデル化を試みている。シミュレーション部分は第5章、第6章、第7章からなり、新しい移動サービスの導入が本当にユーザーの利益になるのかをシミュレーションで分析する。また、群集シミュレーションの空間設計や制御への適用を試みている研究を体系的に整理する。最適化については第8章で、多目的深層強化学習の既存手法を改良することで群集経路誘導戦略最適化などの実問題への適用を試みる。

### 第2章 MaaSにおける交通手段選択モデル

新しい移動サービスの導入初期段階における交通手段選択行動をモデル化し、新しい移動サービスへの選択バイアスを明らかにした。2019年に静岡市で行われたMaaS (Mobility as a Service) の実証実験では、電車やバスが運行している地域にオンデマンド型乗合移動サービス (On-demand shared mobility service; OSMS) を導入し、市民に経路検索が可能なスマートフォンアプリを利用してもらった。このアプリの利用履歴データから交通手段選択行動に関するデータを収集した。交通手段選択モデリングを行った結果、実験環境下でもユーザーの選択行動は直感に沿ったものであったが、OSMSへの選択バイアスが観察された。このことから、実証実験などの導入の初期段階では効果検証を行う際には、新しい移動サービスに対する選択バイアスを考慮することが重要であることが示唆された。

### 第3章 群集シミュレーションのための経路選択モデル

歩行者の実移動データを用いて経路選択モデリングを行い、他人に追従する行動や誘導に従わない自律的な行動の存在を定量的に明らかにし、それを考慮したシミュレーションにより群集移動の再現性を高めることができることを示した。実験では、劇場での避難訓練や数万人が移動する花火大会での群集の移動を計測し、経路選択モデルを組み込んだ群集シミュレーションが、実

際の大規模な群集の移動をより正確に再現できることを証明した。

#### 第4章 半教師あり選択モデリング

選択モデリングに機械学習的な手法を取り込むことを試みた。情報科学の分野では、人間の情報処理を高精度にモデル化するニューラルネットワークの技術が開発されている。そのため、ニューラルネットワークを組み込んだ選択モデルである Neural-embedded choice model がいくつか提案されている。Neural-embedded choice model は意思決定における異質な選好をより正確に表現することを可能にする。一方、ニューラルネットワークを用いたモデルの学習には大量のデータが必要である。本研究では、半教師あり学習により、少ないデータ量でも選択モデルの推定が可能であることを示した。

#### 第5章 MaaS のシミュレーション分析

MaaS が利用者にもたらすメリットについて、シミュレーションによる分析を行った。電車やバスに加えて OSMS を導入し、交通手段の選択肢を増やすことが利用者にとってどのようなメリットがあるのかを、静岡での MaaS 実証実験の設定に即して検討した。その結果、MaaS、つまり OSMS の導入は利用者の便益を高めるが、利用者数が少ないうちは事業者の利益は減少することがわかった。一方、利用者数が増加し、OSMS の車両数や運賃が調整されると、事業者は利益を得ることができる。しかし、OSMS の導入により電車やバスのシェアが減少するため、各事業者間の調整が必要であることも明らかになった。

#### 第6章 オンデマンド型乗合移動サービスのシミュレーション分析

OSMS に Meeting Point (MP) を導入することの利点をシミュレーションにより分析した。OSMS は一般に、乗客の出発地と目的地の間のドア・ツー・ドアの移動を提供する。また、MP と呼ばれるバス停のような特定の送迎場所を利用したサービスも展開されている。乗客に MP まで歩いてもらうことで、OSMS の運行効率を向上させることができる。一方で、乗客に対するメリットは十分に分析されていなかった。そこで、簡単な設定による静的分析と、実際の道路ネットワークデータを用いたシミュレーション分析を行った。その結果、MP の導入により、需要数がある閾値より大きい場合、車両走行距離が減少し、さらに乗客の平均移動時間も減少することが示された。

#### 第7章 群集シミュレーションによる分析と最適化の研究動向

群集シミュレーションの空間設計や群集制御への応用についての体系化を行なった。まず、群集移動の効率性と安全性の評価指標を紹介した。次に、空間設計に関する現在の知見を説明し、群集制御の方法を歩行者の行動レベルに応じて分類した。最後に、これまでの調査結果をもとに、課題やアプローチについて考察を行い将来の研究の方向性について議論した。

#### 第8章 多目的深層強化学習による群集制御

現実世界での複数のステークホルダーが資源を奪い合うためステークホルダー間の調整が必要である。本章では複数ニーズの調整手法の一つである多目的深層強化学習の実問題への適用性を検討した。多目的深層強化学習の手法の一つである Pareto-DQN の問題点を調査し、その改善策を提案した。また、トイプロブレムや群集誘導戦略の最適化問題を用いた実験を通して、改善版の Pareto-DQN が実問題へ適用可能であることを示した。またさらなる改善について議論を行なった。

#### 第9章 結論

今後の課題について述べ、本論文の総括を行なった。

## 論文審査結果の要旨

シミュレーションは、高度な移動のマネジメントに必要な技術であり、移動サービス、群集移動解析、サービス設計や施策決定における共通基盤技術となることが期待される。本論文は、シミュレーションのためのモデリングやシミュレーションを用いた分析および最適化に関して、人やユーザーの視点を重視した移動サービスに関する研究成果をまとめたものであり、全編 9 章からなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第 2 章では、Mobility as a Service (MaaS) の実証実験で用いられた経路検索アプリのログデータから交通手段選択のモデリングを行なっている。この実証実験では鉄道とバスに加えて On-demand Shared Mobility Service (OSMS) が導入されている。モデリングの結果は、これまで示唆されていた MaaS 導入時の新規サービスへの選択バイアスの存在を立証するものであり、重要な成果である。

第 3 章では、大規模な群集の実移動データを用いた、歩行者行動を反映した経路選択モデルおよび群集シミュレータの構築について論じている。従来は簡易的なマクロモデルが用いられていたためシミュレーション結果が現実的ではなかったが、追従行動や誘導に従わない自律的な行動をモデル化するエージェントベースのシミュレーションにより実行の再現性を向上させている。またモデリングとシミュレーションの評価を数万人規模の移動データを用いて行っており、実用性と有用性が高い。

第 4 章では、ラベルが一部ないデータセットを用いた離散選択モデルのパラメータ推定問題に対して半教師あり学習の応用を提案している。これは主に経済学や交通工学で発展してきた離散選択モデルに、機械学習技術を適用するものであり、選択モデリングの新たな拡張を示すものである。

第 5 章では、MaaS アプリデータから抽出したユーザーの移動データや第 2 章で構築した交通手段選択モデル、鉄道やバス、OSMS の運行機能をシミュレータに取り入れた現実的なシミュレーションを提案している。これにより、費用便益分析に基づいた MaaS 導入の評価を行っており、実用性が高い。

第 6 章では、OSMS に Meeting Points (MP) を導入する効果について、様々なシナリオに対して網羅的にシミュレーションを行い、MP 導入が平均移動時間を短縮するというユーザー側のメリットを立証しており、オンデマンド型の移動サービスに新しい可能性を提供している。

第 7 章では、複数の分野で行われている群集シミュレーションの研究の中でも空間設計や群集制御を対象とする 100 以上の論文を体系化して総説している。また現状の課題と解決アプローチについても整理しており、群集シミュレーションの研究者や技術者にとって有用である。

第 8 章では、多目的深層強化学習の改良手法を提案している。これにより群集の誘導戦略最適化のような複雑な問題でもパレート解を獲得できることを立証しており、重要な成果である。

第 9 章は結論である。

以上要するに本論文は、移動のシミュレーションに関するモデリングや分析、最適化の手法の提案と実データに基づく評価を行うとともに、情報学と交通工学の相補的な推進を論じたものであり、システム情報科学ならびに交通計画学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。