

研究終了報告書

「交通流理論と強化学習による都市交通システム最適化」

研究期間: 2021年10月～2024年3月

研究者: 壇辻貴生

1. 研究のねらい

本研究の目的は、交通流理論と強化学習の融合による都市交通システムの最適化手法の開発である。交通分野では、自動車、バス、鉄道など交通手段ごとの理論は確立してきている。しかし、異なる交通手段が相互作用する場合(e.g., 自動車とバス)の交通渋滞の発生メカニズムや渋滞解消のための交通需要マネジメント(TDM)施策の最適化方法に関しては未解明な部分も多い。MaaS(Mobility as a Service)など新たな交通サービスの出現により、人々が異なる交通手段をシームレスに使えるようになるため、交通手段間の相互作用は今後さらに大きくなると考えられる。

情報技術の発展と新たな運送サービス(e.g., Uber や Lyft)の台頭により個人単位の詳細な交通データが取得可能となり、また、次世代 ETC の普及などにより車両軌跡や挙動のデータも取得可能になってきた。それら膨大な交通データから適切に交通に関連する諸量を推定し、TDM 施策による渋滞のない社会実現が期待される。

本研究では自動車とオンデマンド型公共交通が混在する近未来交通システムを対象とする。そして、対象交通システムの渋滞メカニズムを解明し、交通流理論の知見の蓄積を行う。さらに強化学習と融合した多様な交通需要マネジメント施策の最適化手法開発を行う。

2. 研究成果

(1) 概要

交通流理論と強化学習の融合による都市交通システムの最適化手法の開発の目的達成のため、本研究では3つの目標を設定した：(I) 複数交通手段が混在する交通システムにおける交通流ダイナミクスの数理特性の解明、(II) 多様な TDM 施策の最適化可能な枠組みの開発、(III) リアルタイムへの拡張。また、研究遂行する中で、新たな研究テーマが生まれ、交通状態の異常検知手法開発を行った。

(2) 詳細

目標(I)：複数交通手段が混在する交通システムにおける交通流ダイナミクスの数理特性解明

本テーマでは、まず通勤者の交通行動の結果生じる時々刻々と変化する交通状態を解析する交通モデルを開発し、複数交通手段が混在する交通システムにおける渋滞発生メカニズムの解明を行った。交通渋滞とオンデマンド型公共交通の車内混雑が発生するシステム(図 1)を考え、通勤者の出発時刻・交通手段同時選択モデルを開発した。開発したモデルによって、公共交通の利用者数が低い要因が渋滞と公共交通特有の車内混雑である可能性を確認し、既存研究では説明できていなかったメカニズムを明らかとした(図 2)。そして、次に交通需要マネジメント施策を実施した際の交通行動変化の分析を行った。特に渋滞解消のための信号制御と公共交通利用促進のための専用レーン配置を同時に実施した場合の交通行動変化を分析した(図 3)。その結果、専用レーン配置によって公共交通利用が促進される場合と運賃の値下げなど更なる公共交通へのインセンティブが必要な場合など公共交通が利用される条件を数理的に明らかにした(図 4)。

目標(II)：多様な TDM 施策の最適化可能な枠組みの開発

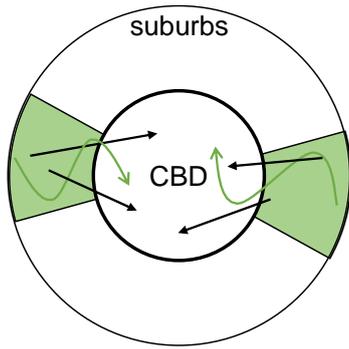
本テーマは、目標(I)の理論解析をベースに実際の交通システムにおける多様な TDM 施策(ここでは、信号制御と専用レーンを扱う。)の最適化手法開発を行った。特に、郊外部と都市部の2地域からなる単純化された交通システムを、多地域モデルに拡張し、強化学習によって最適化する手法を開発した。

目標(III)：リアルタイムへの拡張

目標(II)で開発したような TDM 施策のリアルタイムへの拡張のため、交通データを活用したリアルタイム交通流シミュレーション開発を行った。リアルタイムシミュレーション構築のためには、シミュレーションのインプットとなる次の時間帯の交通需要を予測する必要がある。そして、予測した交通需要を用いた交通流シミュレーションの出力である次の時間帯の交通状態が、実際に観測する交通状態との乖離が最小となる予測器がリアルタイムシミュレーションには必要となる。そこで、本研究では交通データを入力としたニューラルネットワーク(NN)による予測器を用いたリアルタイムシミュレーションの枠組みを開発した。

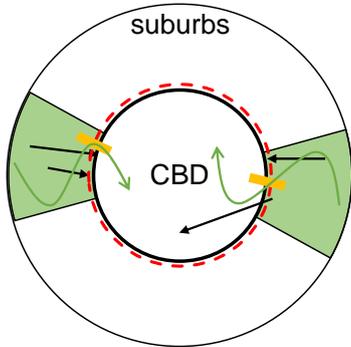
交通状態の異常検知手法開発

多様な交通データ(e.g. 車両感知器や移動軌跡データ)から、普段とは異なる交通状態を検知する異常検知手法を開発した。まず、車両感知器と移動軌跡データから交通システムの交通状態を推定する手法を開発した。次に、推定した交通状態に対して、混合ガウスモデルモデルを適用し、交通状態の異常検知する手法を開発した。東京 2020 オリンピック・パラリンピックの一般道路の交通データをケーススタディに開発した異常検知手法を適用した。その結果、大会期間中の交通需要マネジメントの効果等により、開催期間中はいくつかの日を除いて、異常な



← Car ← FRT ■ Area covered by a line

図 1 交通システムの設定：通勤者が郊外（Suburbs）から都心（CBD）へ通勤するモデル



← Car ← FRT ■ Area covered by a line
- - - Perimeter control ■ FRT dedicated lane

図 3 TDM 設定（CBD の渋滞解消のための流入制御（赤点線）と公共交通のための専用レーン（黄色）

交通状態はほとんど検知されなかった。異常検知された日のうちの一つである 7 月 29 日では、首都高速道路における長時間の車線規制によって、高速道路を走行する車の迂回が生じ、一般道路の交通需要が増え、普段とは異なる交通状態であったことを確認した(図 5)。

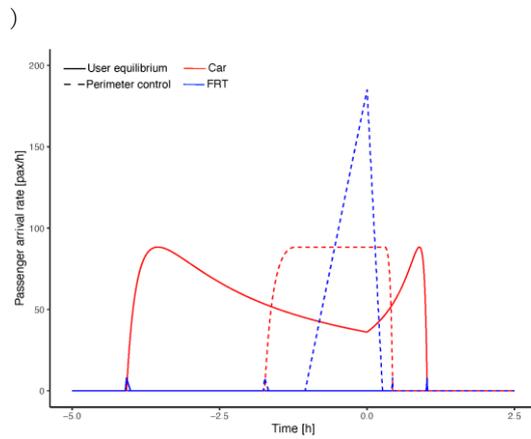


図 2 利用者数の時系列：TDM 実施前は公共交通の利用されない（青点線）、実施後は公共交通利用が促進される（青点線）

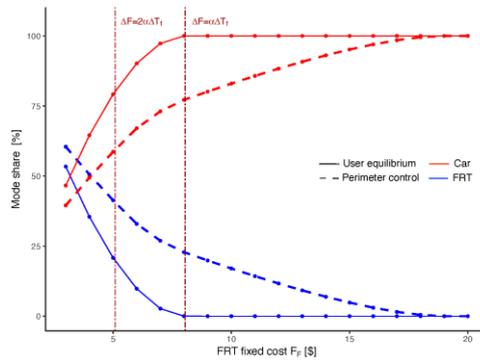


図 4 公共交通運賃に対する利用割合の感度分析：TDM 実施した場合であっても、運賃が高い場合、公共交通が利用されないケースも存在（青点線）

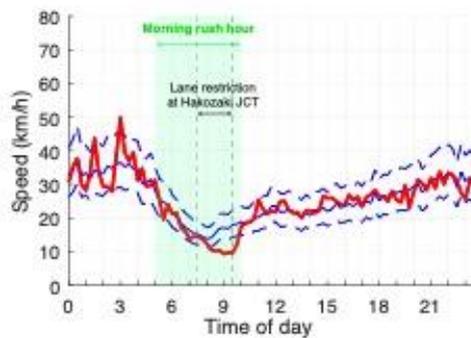


図 5 京葉道路錦糸町付近の交通状態

3. 今後の展開

本研究では、日常的に発生している交通渋滞を解消する TDM 施策最適化手法開発を行った。今後の展開としていくつか挙げられる。まず、開発した異常検知手法とリアルタイムシミュレーションを融合することで、リアルタイムの異常検知・交通制御手法が開発可能である。日常的ではない突発事象(e.g., 事故)を対象に適用が考えられ、突発事象のリアルタイム検知・制御手法として展開が期待できる。次に、今回対象外であった歩行者や鉄道などの交通手段を考慮したモデルに展開することである。特に、MaaS などの出現により、複数交通手段の相互作用が高まることが予想されるため、重要なテーマであると考え。また、これら展開は今後数年で発展させていく予定である。

4. 自己評価

【研究目的の達成状況と研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果】

当初の計画から手法の若干の変更や異動などが重なり、遅れが生じて現在解析が進行しているものがあるものの、設定した目標は概ね達成したといえる。開発した手法は交通分野の基幹的な学術雑誌である *Transportation Research Part B* および *Part C* に掲載されており、研究成果の波及効果は大きいと考えている。また、現在解析中の研究テーマに関しても同様の国際雑誌に投稿予定であり、更なる波及効果が期待できる。また、当初予定していなかった異常検知手法を開発するなど、ACT-X 研究を通じて新たな研究テーマの創出につながった。

【研究の進め方】

異動等によって大幅な遅れが生じたため、研究計画を修正し、研究補助者として大学院生 RA を雇用することで、データ分析の補助を受け、一定程度遅れを取り戻した。その他の部分では、個人で研究を進め、計画通り予算を執行した。

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: 2 件

1. Dantsuji, T., Hoang, N.H., Zheng, N. and Vu, H.L., 2022. A novel metamodel-based framework for large-scale dynamic origin-destination demand calibration. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 136, p.103545.

交通流シミュレータのための交通需要推計は計算負荷が高く、効率的に計算する手法が必要となる。本研究では、巨視的交通流モデルに基づいたメタモデル最適化によって計算効率の高い推計手法を提案した。提案手法を最先端の手法と伝統的な手法と比較し、少ない繰り返し計算で需要推計可能であり、計算効率性に優れた手法であることを示した。

2. Dantsuji, T., Takayama, Y. and Fukuda, D., 2023. Perimeter control in a mixed bimodal bathtub model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 173, pp.267-291.

流入制御と専用レーンの組み合わせは異なる交通手段が混在するバイモーダル交通システムにおいて有効な施策とされている。しかし、これらの施策に対する交通行動の変化は十分に議論されていない。そこで、本研究では出発時刻・交通手段同時選択モデルを構築し、施策

の効果进行分析した。渋滞発生メカニズムや流入制御と専用レーンの組み合わせが有効となる条件などを理論的に明らかとした。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件 (特許公開前のものも含む)

(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)

1. Dantsuji, T. and Takayama, Y. Perimeter control, autonomous vehicle, and urban spatial structure. Annual School and Conference of the International Transportation Economics Association (ITEA 2023), Santander, 2023.

2. 壇辻貴生, 山口裕通. 東京 2020 オリンピック・パラリンピック開催期間における交通状態の異常検知. 第 66 回土木計画学研究発表会・講演集. 2022, 34-07.