

論文の内容の要旨

論文題目 Dynamic Traffic Resource Allocation Problems with Behavioral Choice in Networks

(ネットワーク上の行動選択を考慮した動的交通資源配分問題)

氏名 早川 敬一郎

1 はじめに

本論文では、交通ネットワーク上の利用者の意思決定を考慮しつつ、限られた交通資源の有効活用を目指す、動的な交通資源配分アルゴリズムの構築を試みる。自動運転車両の普及により運転行動に関する意思決定権の一部がドライバーから車両(もしくはシステム)に移譲されることを想定して、従来より高度な交通制御、および交通サービスを実現するための基盤アルゴリズムの構築を目指す。

自動運転車両の普及に伴う交通サービスの導入に関して、都市部と郊外部で異なる課題が存在する。都市部では、自動運転車両による利便性向上に伴って自動車交通量が増加する可能性があり、特定の地点に集中する交通を分散させるための交通制御が必要となる。本論文の第3章では、都市部の過飽和ネットワークで交通集中によるグリッドロック現象の発生を防ぐ交通制御アルゴリズムを提案する。一方、郊外部では、限られた交通資源でより多くの利用者の活動を実現するために、複数の利用者の移動需要を集約する効率的な移動サービスが望まれる。本論文の第4章では、需給が疎な郊外地域を想定し、各々の利用者の時空間制約を考慮しつつも社会的に最適な交通資源配分を実現するアルゴリズムを提案する。これらの都市部、郊外部の二つの問題設定に共通する課題として、交通制御や交通サービスを実施する管理者と、実際に交通資源を利用する利用者との間の非協力的な関係が挙げられる。自動運転車両の普及による利便性向上に伴って、システム最適状態と利用者均衡状態の差分として定義される「無秩序の代償」は拡大する。この差分を補償し、システム最適状態を実現するために、課金制度設計が重要な役割を果たす。本論文の第5章では、利用者の利己的な意思決定を前提として、有限な交通リソースを適切に運用するための動的な課金アルゴリズムを提案する。

2 既往研究

過飽和ネットワークを対象とする動的交通制御の既往研究としては、交通信号制御や流入制御によって交通容量を増加させるものが多く存在する。しかし、複雑な道路ネットワークを有する都心部では、局所的な交通制御によって必ずしもネットワーク全体の交通状態が改善されるとは限らない。多くの既往研究は、ドライバーの不確実な意思決定を自動化、中央集権化することでより良い交通状態を目指す。実社会への導入に当たっては、交通管理者と利用者の相互作用によって生じる複雑な交通現象に留意する必要がある。特に、モビリティサービスにおける利用者の意思決定を考える際には、利用者のトリップの時空間的な連続性を考える

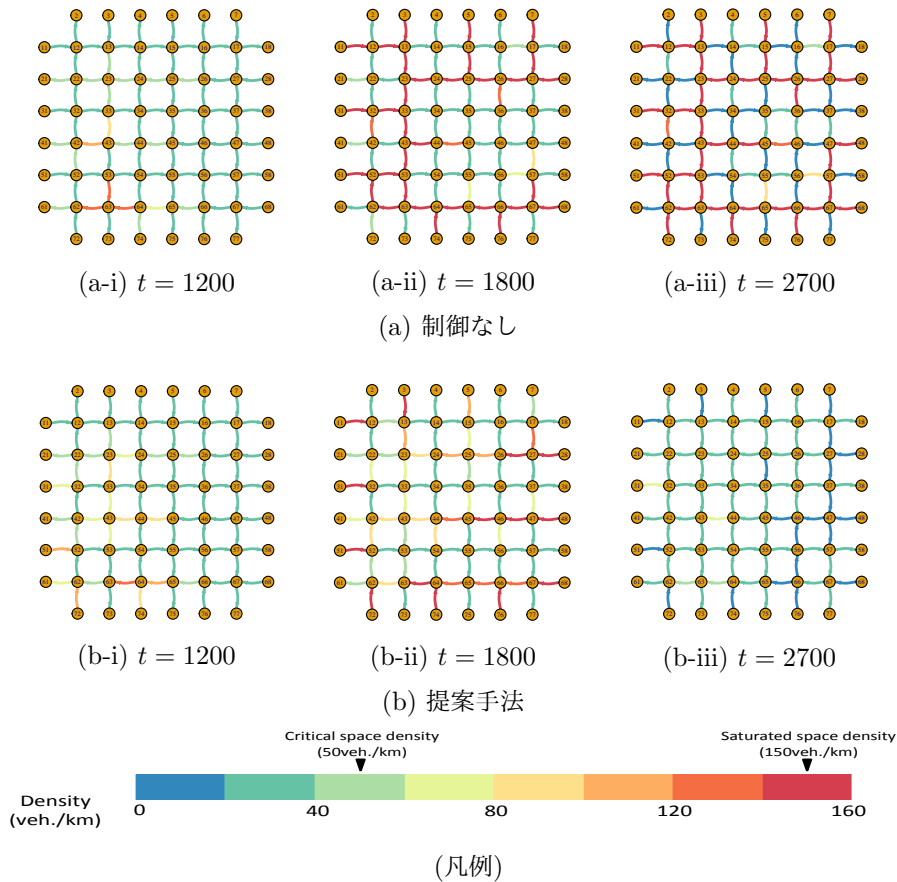
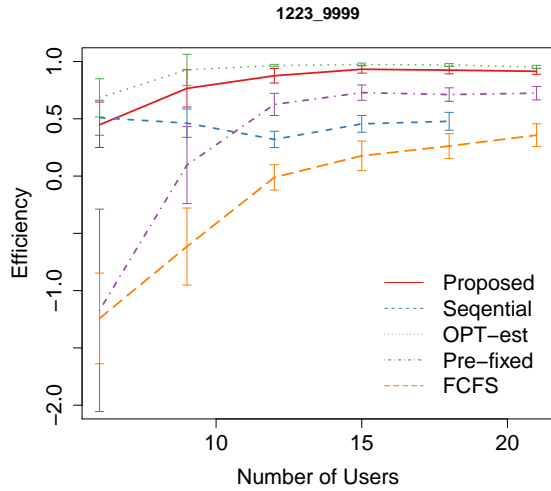


図1 提案手法の効果

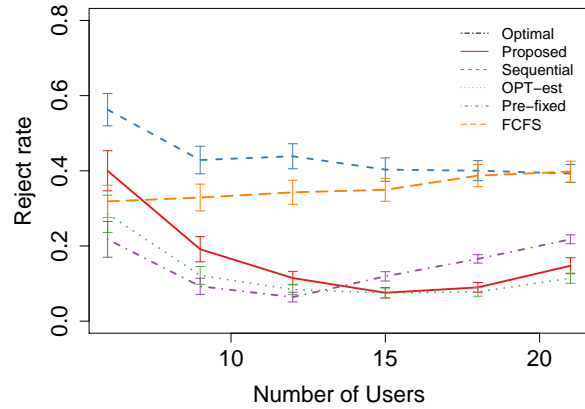
必要がある。そのためには、Activity-based model の枠組みが有用である。個々に異なる時空間制約の中で、時々刻々と変化する外的要因を考慮したうえで、逐次的に行動選択を行う利用者の意思決定を考慮して、社会的に価値を生み出すモビリティサービスを設計するためのアルゴリズムが求められている。

3 閉ループ構造を有する過飽和ネットワークの動的交通制御

過飽和ネットワークを対象とする交通制御には、無秩序に進展する待ち行列の挙動とドライバーの経路選択行動を考慮した動的な制御手法が必要である。本研究では、まず制御の時間遅れに着目し、過飽和ネットワークを対象とする交通制御が満たすべき性質を整理する。次に、道路ネットワーク中の閉ループ構造に着目し、閉ループ中を延伸する待ち行列に起因するグリッドロック現象の発生条件を示す。これらの条件を考慮して、モデル予測に基づいて総旅行時間を最小化する交通制御アルゴリズムを提案し、ドライバーの経路選択行動について二通りのシナリオを考えた数値実験によって提案手法の有効性と課題を示した。図1に数値実験結果の一例を示す。多数の閉ループ構造を有するグリッドネットワークにおいて、制御なしの場合にはグリッドロック現象が発生する過剰な需要の下で、提案する動的交通制御アルゴリズムは円滑な交通を実現していることが分かる。



(a) 配車効率



(b) 需要に対するサービス非提供率

図2 提案手法とベンチマーク手法の配車効率およびサービス非提供率 (**Proposed**: 将来の利用者に関する確率的情報を考慮する配車 (提案手法), **Optimal**: 完全情報下における静的最適配車, **Sequential**: 将来の利用者出現情報が未知の場合の動的最適配車, **OPT-est**: 将来の利用者の出現情報が既知の場合の静的最適配車, **Pre-fixed**: 将来の利用者出現情報が未知の場合の静的最適配車, **FCFS**: 早い者勝ち)

4 疎なライドシェア市場における動的トリップマッチングのための探索的最適化手法

ライドシェアサービスは既に多くの地域で実用化が進んでおり、その最適配車アルゴリズムも提案されている。しかし、その多くは需要も供給も密な都市部を対象にしており、ある地点から別の地点へのトリップベースの移動需要に基づいて配車を最適化するものである。需要や供給が疎な郊外地域においては、出発地から最終目的地までの複数のトリップを一体的にとらえた配車アルゴリズムが必要である。一般的には事前予約サービスが導入されることが多いが、利用者の行動の不確実性により、無駄な待ち時間や行程が発生する可能性がある。状況に応じて柔軟に予約が変更できる仕組みが望まれる。このような課題に対して、本研究では、全ての利用者とドライバーの時空間制約を満たしつつも総旅行費用を最小化する動的なトリップマッチング問題を定式化し、探索的手法を用いた解法アルゴリズムを提案した。数値実験の結果を図2に示す。提案手法は、他の動的配車アルゴリズムと比較して効率的な配車を実現しており、需要に対するサービス非提供率も完全情報下における最適配車に近い値を達成している。

5 活動時間の選好を考慮したモビリティサービスのメカニズムデザイン

第3章および第4章では、いずれも交通システムを動学的な最適化問題として定義し、その解法アルゴリズムを提案した。しかし、交通システムの利用者はシステム管理者の行動に対して利己的な意思決定を行う。例えば、サービスの料金を変化させると利用者の需要はそれに伴って変化する。このため、適切な課金アルゴリズムを用いることで、社会的により望ましい状態が達成できる可能性がある。交通サービ

スへの課金制度の設計によって、社会をより望ましい状態に導く研究の例として、静的な環境下において Vickrey-Clarke-Groves(VCG) メカニズムを用いた交通需要マネジメント手法が提案されている。この制度の下では、利用者均衡状態とシステム最適状態が一致するため、利用者の利己的な行動の結果としてシステム最適状態が導かれる。VCG メカニズムを動学的に拡張した研究としては、Dynamic pivot および online VCG メカニズムが知られている。これらのメカニズムの下では、利用者の動学的なベストレスポンス戦略によってシステム最適状態が実現する。本研究では、利用者の時空間プリズム制約が重要な意味を持つオンデマンド型交通の分野において、これらのメカニズムに基づく課金制度を組み合わせた交通サービスアルゴリズムを提案し、その効果や課題を示す。

6 おわりに

本論文では、自動運転車両の普及に伴って進化する交通制御システムやモビリティサービスについて、動学的な交通現象を考慮した交通信号および交通サービスのアルゴリズムを提案した。第3章では、時間軸に沿って連鎖する交差点の混雑に対して、時間遅れを考慮した制御変数を導入することで、単独の閉ループへの交通集中によって発生するグリッドロック現象を予防し、大量の需要に対して有限の道路資源を効率的に活用する交通制御アルゴリズムを提案した。第4章では、時間軸に沿って展開する交通サービス利用者の意思決定の異質性を考慮して有限の交通資源を効率的に活用する交通サービスアルゴリズムを提案した。第5章では、利用者の動学的意思決定をシステム最適状態に誘導するための動的な課金アルゴリズムを提案した。いずれの問題も集計的な交通量や単独トリップ需要を対象とする従前の研究では解決が難しいものであるが、本論文では、時間軸上に展開される交通現象の動学的特性を理解し、求められる交通制御および交通サービスを定式化するとともに、その解法アルゴリズムを提案した。

従来の交通システムの多くは、できるだけ多くの人をできるだけ短時間で輸送することを目指しており、交通制御アルゴリズムにおいても、総旅行時間最小化が目的関数とされることが多かった。そこでは、人々の持つ価値の多様性は考慮されておらず、交通弱者への配慮も十分ではなかった。新しい時代のモビリティサービスは、豊富な計算資源と大量のデータを用いて、都会や郊外そして過疎地域と様々な状況の下で、交通弱者を含む全ての利用者に対して、それぞれの地域、それぞれの利用者ごとに価値を提供することが望まれる。そのためには、サービスを繰り返し利用する利用者の蓄積されたデータを用いて、各利用者の活動の価値を個別に推定する技術が必要である。また、各々の利用者は自身が認識する有限の選択肢集合の中で意思決定を行っていると考えられるが、その選択肢集合を拡大することで当該利用者のみならず社会全体の効用を増加させられる可能性がある。そのため、モビリティサービスにおいても、利用者ごとにカスタマイズされたおすすめのお出かけプランを提示するリコメンデーションシステムなどの普及が望まれる。本論文では、時空間制約下で動学的な意思決定を繰り返す利用者に注目して交通制御や交通サービスのアルゴリズムを提案したが、今後の研究においては、個々の利用者ごとに得られた移動および活動のデータを用いて、利用者の意思決定をより深く理解したい。