

動的スケジューリングオークションに基づく交通量配分と解空間全列挙による最適化計算

東京大学 土木学部 学生会員 ○村橋 拓真

東京大学 土木学部 正会員 羽藤 英二

1. はじめに

ライドヘイリングや自動運転といったモビリティサービスの IT の進歩により登場している。これらのサービスの運用効率性を高める手法として通行権取引制度が挙げられる。これは利用者に通行権を分配し、利用者間で相互取引を行い、利用者が通行権を使用して交通サービスを利用することが想定している。通行権取引制度やロードプライシングにより SO の実現を試みた先行研究¹⁾²⁾³⁾は、交通流配分モデルへの拡張性、システムの動学性の点で課題を抱えたものが多い。通行権取引制度では、各ユーザーが自身の移動に対して価値を考慮し通行権を相互取引するが、自律的な SO の達成は見込めない。運用効率を最大化するため、通行権の配分決定手法としてオークションメカニズムを導入し、市場をデザインする必要がある。システムは各ユーザーの価値関数を元に、全ユーザーの経路の最適な組み合わせを計算し、ユーザーは配分された通行権を利用して移動し、他者に与えた外部性に相当する額を支払う。

本研究は小規模なシステムにおける通行権取引制度およびオークションメカニズムによる交通量配分問題を論じ、それに対する効率的な計算メカニズムを提案する。

2. システムのフレームワーク

近い将来の自動運転車の交通流が十分に予測可能であるという仮定の元、タイムステップを用いて時間を離散的に表現し、道路ネットワークを時間構造化する。時間構造化ネットワークの各エッジに対して通行権を設定する。各ユーザーはシステムにより決定された通行権の組み合わせを利用し、時空間的な経路を移動する。

オークションとは、財に対しての参加者の評価額をもとに財の配分を決定するメカニズムである。本研究の場合、各エッジに対して各ユーザーが表明した評価額をもとに、通行権の最適配分を計算する。新規の入札やスケジュールの変更が逐次的に発生する場合、オークションを入札に合わせて繰り返し開催し解を動的に変化させていく必要がある。また、各タイムステップの通行権のみを対象とし、

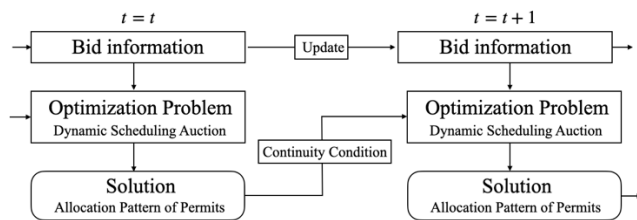


図-1 動的スケジューリングオークションのフレームワーク

局所解を決定するオークションを開催するのではなく、スケジューリングオークションとして十分なタイムステップの通行権の最適配分・組み合わせを計算し、よりシステムの効率性をあげる。配分手法として Vickrey-Clarke-Groves(VCG)メカニズムを動的に適用し、支払額を最終的に他者に与えた外部性として定義することにより、逐次的に発生する全オークションにおける効率性と対戦略性を保証する。VCGメカニズムによる通行権最適配分問題は、通行権の配分ベクトルと各ユーザーの時空間エッジに対する評価額をまとめた評価額ベクトルの内積を目的関数とした0-1整数計画問題として定式化される。各時空間エッジにおいて通行可能な車両数は有限であり、これを制約条件と組み込むことでシステムは渋滞の発生を防ぐ。

通行権配分のためオークションを開催するに際し、システムは各ユーザーの各通行権に対する価値関数が必要となる。しかし、時間構造化ネットワークのエッジ数は膨大であり、通行権単位でユーザーが評価額を直接的に表明することは現実的に不可能である。この問題に対し、時間構造化ネットワークにおける各ノードでの即時効用と目的地への価値関数を Bellman 方程式に落とし込み、時間割引率を導入した Discounted Recursive Logit(dRL)モデルで計算される各エッジでの効用を評価額と解釈することで機械的に推定するシステムを考案した。

3. 計算アルゴリズム

通行権最適配分問題は組み合わせ最適化問題であり、NP-hard に分類され直接的に解くことは不可能である。線形緩和が適用可能な定式化に成功したが、逐次的に発生す

キーワード Social Optimum, 通行権取引制度, VCGメカニズム, ZDD

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 工学部一号館 東京大学大学院工学系研究科 交通・都市・国土学研究室

るオークションからの再計算に対し、その都度解を一から計算することは現実的でない。ここでは離散的な解空間を全て列挙し、それぞれの配分パターンにより達成される社会総余剰で索引化をすることで、最適解を探索する。

この時、組合せ爆発により解空間は指数関数的に大きくなるために、一般的な数え上げ手法を用いた場合、計算機がメモリ負荷に対して耐えられない。この問題に対し、ZDD(Zero-suppressed Binary Decision Diagram)⁷⁾を用いた。1-枝が0-終端節点を直接指す場合にその節点を削除し、0-枝の行き先に直結させることで、ZDDは特に疎な組み合わせ集合に対して高い圧縮性能を持つ。交通分野での適用事例は多くないが、自動運転車両の軌道制御の最適化手法としてZDDによる全列挙を用いたもの⁸⁾などが挙げられる。この手法の優れた点は再計算に対しての計算量を大幅に削減可能なところにある。ZDDの逐次的に更新により、解の連続性を保ちながら列挙数を大幅に縮約することができる。一方、ネットワークの大規模化/サービスの大規模化に伴って一度の列挙数が増大した場合、組合せ爆発により計算時間が指数関数的に増大してしまうという弱点も抱える。実際のサービスに落とし込む際には、小規模なネットワーク規模ごとにユーザーをマッチングし、分散協調制御によりサービスを運営する必要があるだろう。

数値実験の結果を見ると、オークションが進行するにつれ解空間が拡大し、線形緩和を用いた手法の計算時間が短調に増加しているのに対し、ZDDを用いた全列挙手法は再計算に対して特に高い計算性能を示した。

3. 結論

本研究では動的なスケジューリングオークションを組み込んだ通行権取引制度による自動運転の交通流の動学最適化を論じた。近い将来の自動運転車の交通流を十分に予測可能と仮定することにより容量制約つき時間構造化ネットワークを構築し、各エッジに対して通行権を付与した。各エッジに対する各ユーザーの評価額をdRLモデルにより機械的に推定した。通行権の最適配分問題をスケジューリング問題と捉え、大局的な解を探索した。これにあたり重大な二つの問題が生じた。一つはオークションにおける対戦略性の保証であり、もう一つは計算負荷の高さ：1)通行権の最適配分問題がNP-hard、2)逐次的に発生するオークションから高頻度で要求される再計算、である。一つ目の問題に対し、動的なVCGメカニズムを提案した。これによりオークションの効率性と対戦略性が保証される。二つ目の問題に対し、ZDDに基づく解空間の全列挙

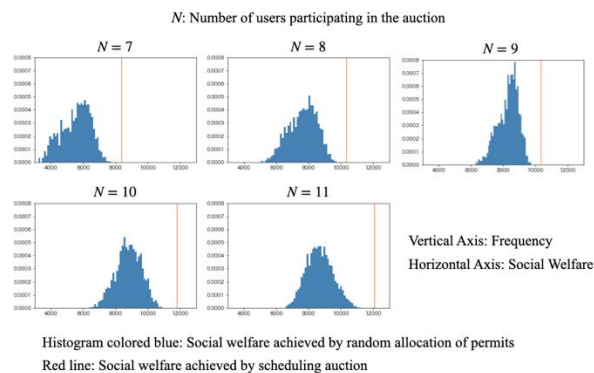


図-2 オークションの導入による社会総余剰の向上

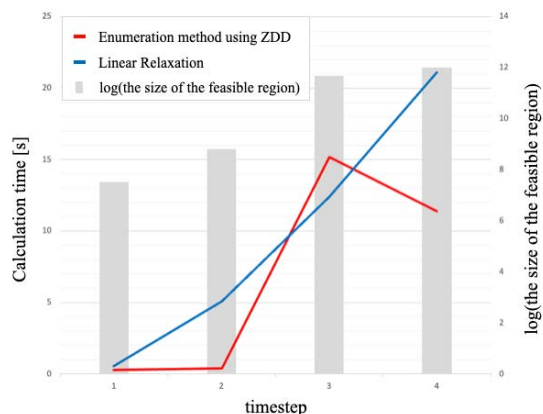


図-3 タイムステップごとの解空間と計算時間の変化

手法を提案した。数値実験を通じ、小規模なシステムでは非常に高速に再計算を行うことが可能であると示された。

今後の課題としては、フレームワークに車線の最適配分問題を組み込み、道路ネットワーク全体の最適化可能なものへと拡張することが挙げられる。また、現在の計算アルゴリズムをより大きなシステムに対応可能にする必要があるだろう。GCN(Graph Convolutional Network)モデルを通じた近似解の探索等が考えられる。

参考文献

- 1) J. M. Viegas: Making urban road pricing acceptable and effective: searching for quality and equity in urban mobility, *Transport Policy*, Vol. 8, No. 4, pp. 289-294, 2001.
- 2) D. Wu, Y. Yin, S. Lawphongpanich, and H. Yang: Design of more equitable congestion pricing and tradable credit schemes for multimodal transportation networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 46, No. 9, pp. 1273-1287, 2012.
- 3) Y. Hara and E. Hato: A car sharing auction with temporal-spatial OD connection conditions, *Transportation Research Procedia*, Vol. 23, pp. 22-40, 2017.
- 4) S. Minato: Zero-suppressed bdds for set manipulation in combinatorial problems, pp. 272-277, 1993.
- 5) S. Fukuyama: Dynamic game-based approach for optimizing merging vehicle trajectories using time-expanded decision diagram, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 120, No. 102766, 2022.