

時空間エッジオークションと 解空間全列挙による最適化計算アルゴリズム

村橋 拓真¹・羽藤 英二²

¹ 学生会員 東京大学 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

E-mail: murahashi@bin.t.u-tokyo.ac.jp

² 正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp (Corresponding Author)

自動運転車両やライドヘイリングの運用効率の最適化手法として、再帰的構造を持つネットワーク上に動的な通行権制度を導入し、その配分パターンの決定における手法として VCG(Vickley-Ckarke-Groves)メカニズムを適用することを提案する。この通行権制度は交通配分モデルに適用可能なものであり、効率性と耐戦略性を備えたものである。一方、通行権の配分パターンの決定問題である動的なスケジューリング問題は NP 困難に分類され計算負荷が高い上に、スケジュール変更や新規の入札に伴い再計算に対する負荷が高い。このような問題に対して本研究では、選択枝を構造化処理した ZDD(Zero-suppressed Binary Decision Diagram)による解空間の全列挙手法を提案し、線形緩和手法と比較することで、再計算に対するその高い性能を示す。

Key Words: *Social optimum, tradable permits, VCG mechanism, ZDD, linear relaxation*

1. はじめに

現在の道路ネットワークでは各ドライバーが自由意思のもとに走行し、利用者均衡[UE: User Equilibrium]が保たれている。各々のドライバーには移動に対してのそれぞれの目的があり、移動に対して異なる時空間的な制約条件と価値関数を持っていると仮定する。

この時、システム最適[SO: Social Optimum]とはこれらの制約条件や価値関数を踏まえた上で、道路空間全体の社会総余剰の最大化に基づき、車両の挙動を制御した状態を指す。SO の現実的な達成は現実的には難しい。その理由として、システム側に車両の挙動を制御する手段が乏しいこと、各ドライバーの制約条件や価値関数をシステム側は検知できないことが挙げられる。UE から SO へと近づける代表的な手法としてはロードプライシング¹⁾が挙げられる。

ライドヘイリングや自動運転といった新しいモビリティサービスが IT の進歩により登場している。サービスの運用効率性を高める手法としての通行権取引制度では、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輸送サービスを利用することが想定される。

過去に提案された通行権取引制度には、混雑課金と比較しながら二分法を適用したもの²⁾、社会に与える影響を加味したもの³⁾、渋滞価格との比較を行ったもの⁴⁾、Origin-Destination の異質性に着目し、配分方法としてスケジューリングオークションを導入したもの⁵⁾等が挙げられる。概して交通流配分モデルへの拡張性、またシステムの動学性の点で課題も少なくない。現実には、自動運転が導入される際には、道路ネットワークの車線が"自動運転車両専用車線"、"手動運転車両専用車線"、"混在車線"の三種類に分配されることから、通行権の最適配分問題を下位問題とした、車線の最適配分問題が発生することになる。この際、交通流配分モデルへの拡張性を備えていることが重要であると言えよう。

通行権取引制度においては、各ユーザーが自分自身の移動に対して価値を考慮し通行権を相互取引した結果、システムの運用効率が高められる。しかし、この配分はユーザー間での取引に依存したものであり、最終的に最適なマッチングが達成させるとは限らない。このため、通行権の配分決定手法にスケジューリングオークションを導入し、各ユーザーの入札から計算される価値関数を元に、全ユーザーの経路の最適な組み合わせを計算することが求められる。オークションとは、社会における財

の割り当てを考えるとときに望ましい配分を自律的に実現するための仕組みであり、経済学のメカニズムデザイン分野で研究が進められている。然しながら、オークション理論に関する経済学的な研究はシステムの理論的な頑健性を重視したものが多く、実用的なアルゴリズムの計算性能等に注目したものは多くない。

2. システムのフレームワーク

本章では、想定する通行権取引制度の設定を整理した上で、通行権の最適な配分パターンを動的に決定するスケジューリング問題を定式化する。

(1) 通行権取引制度の設定

近い将来の交通流が十分に予測可能であると仮定したとき、タイムステップを用いて時間を離散的に表現することで、道路ネットワークを時間構造化することができる。本研究では、図-1のように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。各エッジは空間的な遷移に対し、その間の時間遷移を与えたものであり、各ユーザーはエッジの組み合わせを利用することで空間的な経路を移動することが可能になる。

オークションとは、財に対する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。本研究の場合であれば、各エッジに対して各ユーザーが持つ評価額をもとに、通行権の配分をシステムが計算することになる。オークションに基づいて通行権の配分を行うに際し、オークションの主催者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に近い。

本研究ではこの問題に対し、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、逐次的かつ再帰的にパスを選択する Recursive Logit(RL)モデルに時間割引率を導入した Discounted Recursive Logit(dRL)モデル⁹⁾に基づいて機械的に推定するシステムを考案した。時間構造化ネットワークの経路選択問題に対し dRL モデルを適用し、各エッジに対しての効用を評価額と解釈する。蓄積された利用者データからパラメータの精度を高めることにより、限定的なユーザー情報から時間構造化ネットワーク全体に対する価値関数を高い精度で推定することが可能になる。

(2) 通行権最適配分問題の定式化

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。ここでは各タイ

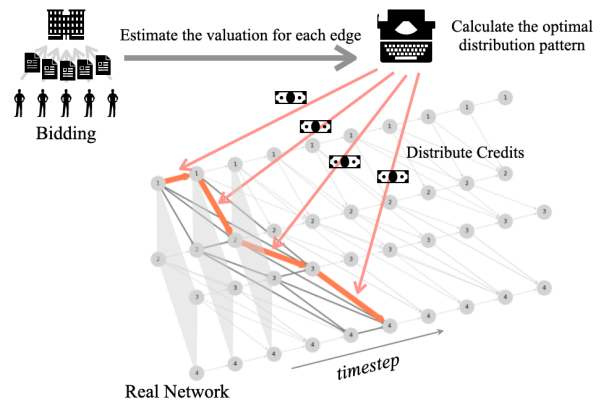


図-1 容量制約付き時間構造化ネットワークに対する通行権の配分イメージ

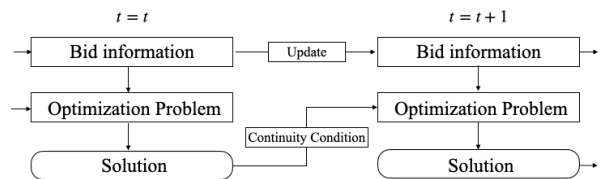


図-2 動的なスケジューリングオークションの計算フローチャート

ムステップでのオークションにおける通行権配分をスケジューリング問題、つまり各ユーザーの経路を時空間的に調整する組み合わせ最適化問題によって導く。この動的なスケジューリングオークションは更新された入札情報を元に行われ、各タイムステップにおける配分は、過去の通行権配分の結果と整合性を持つ必要がある。

タイムステップ t におけるオークションを考える。時間構造化ネットワーク G の各エッジに対する全ユーザーの評価額が正確に得られているとし、それらを価値ベクトル $v_t = \{v_{i,e}\}$ としてまとめる。全ユーザーに対する通行権の配分も同じ様に配分ベクトル $x_t = \{x_{i,e}\}$ とする。

G の全エッジ数を E 、全ノード数を V 、タイムステップ t のオークションに参加する全ユーザー数を N_t としたとき、式(1), (2), (3), (4), (5)のように 0-1 整数計画問題として定式化を行うことが可能である。

$$\begin{aligned}
 & \text{maximize}_{x_t \in \{0, 1\}} \quad \mathbf{v}^\top \mathbf{x}_t & (1) \\
 & \text{subject to} \quad \begin{bmatrix} B_1 & & O \\ & \ddots & \\ O & & B_1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} & (2) \\
 & \quad \begin{bmatrix} B_2 & & O \\ & \ddots & \\ O & & B_2 \end{bmatrix} \mathbf{x}_t \leq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} & (3) \\
 & \quad [I_E \quad \cdots \quad I_E] \mathbf{x}_t \leq \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_E \end{bmatrix} & (4) \\
 & \quad C_t \mathbf{x}_t = \mathbf{g}_t & (5)
 \end{aligned}$$

式(1)は 0-1 整数計画問題の目的関数を「オークションの勝者が獲得する効用の総和」としている。一つ目の制約条件である式(2)は時空間的な推移の連続性を保証するものであり、二つ目の制約条件である式(3)により各個人に配分される通行権により達成される移動が単一なものとなっている。三つ目の制約条件である式(4)は通行権の配分パターンが容量制約を満たすものであることを保証するものであり、最後の制約条件の式(5)は $t-1$ で行われたオークションの結果と t における配分との整合性を保つものである。

ただし、 $B_1 \in \mathbb{Z}^{(V-2) \times E}$ は時間構造化ネットワーク \mathcal{G} の接続行列 $A(\mathcal{G})$ のうち、始点と終点に対応する行以外で構成された部分行列、 $B_2 \in \mathbb{N}^{1 \times E}$ は $A(\mathcal{G})$ のうち、始点に対応する 1 行で構成された部分行列、 I_E は、大きさ E の単位行列とする。 μ_e は時間構造化ネットワーク \mathcal{G} に含まれるエッジ e に対して配分可能な通行権の最大数である。また、 C_t は大きさ $N \times E$ の対角行列であり、その対角成分 $c_{i,e}$ とベクトル \mathbf{g}_t の要素 $g_{i,e}$ は式(6)、式(7)に従う。なお、 t 以前のタイムステップに対応するノードを始点とするエッジ集合を $E'(t)$ 、 $t-1$ のオークションでユーザー i に対し通行権が配分されたエッジ集合を $E_i^*(t-1)$ 、実ネットワークにおける始点での滞在に相当するエッジ集合を $E_{i,origin}$ とする。

$$c_{i,e} = \begin{cases} 1 & e \in E'(t) \wedge e \notin E_{i,origin} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$g_{i,e} = \begin{cases} 1 & e \in E'(t) \wedge e \in E_i^*(t-1) \wedge e \notin E_{i,origin} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

各タイムステップのスケジューリングオークションにおける通行権配分を決定するにあたり、二つの重要な問題が伴う。

一つ目の問題は、オークションの耐戦略性である。戦略的入札により自分の評価額と異なった値を意図的に表

明するユーザーがオークションに存在していた場合、社会総余剰の最大化を行うことができない。従って、各ユーザーにとって正直入札をすることが支配戦略であるようにオークションをデザインする必要がある。

二つ目の問題は、通行権券最適配分問題を解くにあたり、多大な計算負荷が発生することである。これは NP 困難に分類され、直接的に厳密解を求めることは現実的ではない。さらに、本研究が想定する動的なスケジューリングオークションでは、短いスパンで再計算が繰り返し発生する。

(3) VCG メカニズムの適用

VCG メカニズムとは、公共財の効率的な配分が自動的に達成されるようにデザインされた、オークションメカニズムである。私たちは、時間構造化ネットワークのエッジ単位の通行権を公共財とした動的なスケジューリングオークションに対応するように VCG メカニズムをデザインした。これは4つのステップで定義される。

- 1) 新規ユーザー、スケジュール変更をするユーザーは自身の情報を表明する。
- 2) dRL モデルを用いて時間構造化ネットワークの各エッジに対する評価額を推定し、入札額ベクトル \mathbf{b}_t としてまとめる。
- 3) オークションの主催者は、エッジごとに配分可能な通行権の最大数の制約を満たしつつ、配分に対する入札額の和が最大化されるように通行権の配分を行う。
- 4) オークションにおける勝者は通行権に対しての支払を行う。この時、支払額は「勝者が参加した全オークションを通じて他者に与えた外部性の総和」に相当する。

命題 1

時間構造化ネットワークのエッジ単位での動的なスケジューリングオークションに対応する VCG メカニズムは効率的な配分と正直表明を達成する。

Proof.

ユーザーが正しく自身の情報を表明するならば、オークションの主催者は dRL モデルを通じて価値関数を正確に知ることができるとする。

まず、制約条件式(2)、(3)、(4)、(5)の元で正しい評価額ベクトル \mathbf{v}_t と配分ベクトル \mathbf{x}_t の内積を最大化したとき、その状態はシステム最適に相当する。つまり、全ユーザーが正直に入札を行い、 $\mathbf{b}_t = \mathbf{v}_t$ が成立する場合、オークションは効率的な配分を達成することが保証される。

次に、メカニズムの耐戦略性を示す。耐戦略性とは各ユーザーにとって入札を正直に行うことが弱支配戦略で

あることを指す。ユーザーが表明した情報から dRL モデルを通じて推定された、タイムステップ t における入札額ベクトルを \mathbf{b}_t とする。

オークションにより決定される通行権配分は全て過去の配分結果との連続性を保ったものでなくてはならない。よってタイムステップ t のオークションにおける配分は、タイムステップ t における入札額ベクトル \mathbf{b}_t と、それ以前に行われた全オークションに対する入札額ベクトルに依存し、 $S(\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_t)$ と表記される。また、これにより達成される社会総余剰を $W(\cdot)$ とする。このとき、タイムステップ t' にオークションに参加したユーザー i の支払額 $P_i(\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_t)$ は以下の式(8)で計算される。

$$P_i(\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_t) = W(\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{0}, \mathbf{b}_{t',-i}, \dots, \mathbf{0}, \mathbf{b}_{t,-i}) - W_{-i}(\cdot) \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{b}_{t,-i}$ はタイムステップ t のオークションでの評価額ベクトルからユーザー i に関する要素を抜いたベクトル、 $W_{-i}(\cdot)$ は達成された社会総余剰からユーザー i の得た効用 $\mathbf{b}_i \cdot S_i(\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_t)$ を減じたものとする。

ユーザー i 以外のオークションの全参加者が正直入札をし、 $\mathbf{b}_{-i} = \mathbf{v}_{-i}$ が成立しているとき、ユーザー i にとっての支配戦略を考える。このときユーザー i の得る余剰は式(9)で計算される。

$$\begin{aligned} & \mathbf{v}_i \cdot S_i(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{b}_{t',i}, \mathbf{v}_{t',-i}, \dots, \mathbf{b}_{t,i}, \mathbf{v}_{t,-i}) \\ & - P_i(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{b}_{t',i}, \mathbf{v}_{t',-i}, \dots, \mathbf{b}_{t,i}, \mathbf{v}_{t,-i}) \\ = & \mathbf{v}_i \cdot S_i(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{b}_{t',i}, \mathbf{v}_{t',-i}, \dots, \mathbf{b}_{t,i}, \mathbf{v}_{t,-i}) \\ & + W_{-i}(\cdot) - W(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{0}, \mathbf{v}_{t',-i}, \dots, \mathbf{0}, \mathbf{v}_{t,-i}) \\ = & \mathbf{v} \cdot S(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{b}_{t',i}, \mathbf{v}_{t',-i}, \dots, \mathbf{b}_{t,i}, \mathbf{v}_{t,-i}) \\ & - W(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{0}, \mathbf{v}_{t',-i}, \dots, \mathbf{0}, \mathbf{v}_{t,-i}) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $W(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{0}, \mathbf{v}_{t',-i}, \dots, \mathbf{0}, \mathbf{v}_{t,-i})$ はユーザー i が表明する情報に依存しない。従って、ユーザー i の支配戦略は、 $\mathbf{v} \cdot S(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{b}_{t',i}, \mathbf{v}_{t',-i}, \dots, \mathbf{b}_{t,i}, \mathbf{v}_{t,-i})$ を最大化するような入札をすることとなる。ここで、オークションにおける配分パターンを決定する最適化問題を踏まえると、任意の $\mathbf{b}_{t',i}, \dots, \mathbf{b}_{t,i}$ に関して式(10)が成立する。

$$\mathbf{v} \cdot S(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{b}_{t',i}, \mathbf{v}_{t',-i}, \dots, \mathbf{b}_{t,i}, \mathbf{v}_{t,-i}) \leq \mathbf{v} \cdot S(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_t) \quad (10)$$

つまりユーザー i にとっての支配戦略は $\mathbf{b}_i = \mathbf{v}_i$ となるように、正直入札を行うことであると示された。 ■

2. 計算アルゴリズム

式(1), (2), (3), (4), (5)から構成される 0-1 整数計画問題は NP 困難に分類され、計算負荷が高い。また、動的なオークションでは度々再計算が発生する。本章では、異なる着眼点から計算の効率性を向上させる、二種類の計算アルゴリズムを提案する。

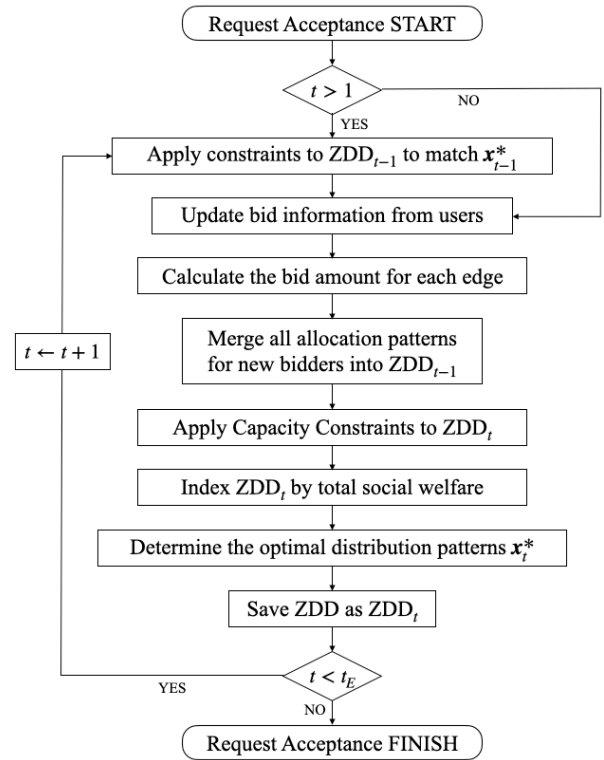


図-3 ZDD を用いた解空間の全列挙手法による通行権最適配分問題の求解アルゴリズム

(1) ZDD を活用した解空間の全列挙手法

通行権最適配分問題は組み合わせ最適化問題であり、解空間は離散的に存在する。この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とが可能である。然しながら、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くなってしまう。本研究ではこの問題に対し、ZDD(Zero-suppressed Binary Decision Diagram)⁷⁾⁸⁾を用いた。

BDD(Binary Decision Diagram)は組み合わせ二分木に対して、等価な節点の共有と冗長節点の削除を行うが、ZDD は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、特に疎な組み合わせ集合に対して高い圧縮性能を持つ。また、ZDD を用いて、列挙集合の索引化や集合演算を行うことができる。このような機能を活用することで、「解空間を全列挙し、目的関数で索引化を行うことで最適解を探索する」と言ったアプローチで離散最適化問題を解くことができる。交通分野での ZDD 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⁹⁾などが挙げられる。本研究では図-3 に示すフローチャートに従い、動的スケジューリングオークションでの通行権最適配分問題を解く。

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 を逐次的に更新していくことにより、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。

(2) 線形緩和の適用

式(1), (2), (3), (4), (5)から構成される 0-1 整数計画問題は NP 困難に分類され、計算負荷が高いが、整数制約を外した線形緩和問題(LP)であれば多項式時間で解を計算することが可能である。(LP)の制約条件行列Aが完全ユニモジュラである場合、(LP)の実行可能領域の全ての極値点は整数であることが知られている。このとき実行可能領域は整数多面体となり、(LP)を解くことで元問題(DP)の解を探索することが可能である。

命題 2

(LP)の制約条件行列Aは完全ユニモジュラである。

命題 2 の証明には以下の補題 1, 補題 2 を用いる。それぞれの証明はここでは省略する。

補題 1

行列A ∈ Z^{m×n}が完全ユニモジュラ ⇒

- 1) A^t ∈ Z^{n×m}は完全ユニモジュラ
- 2) -A ∈ Z^{m×n}は完全ユニモジュラ
- 3) [A I] ∈ Z^{m×(n+m)}は完全ユニモジュラ
- 4) [A -A] ∈ Z^{m×(n+n)}は完全ユニモジュラ

補題 2

任意の有向グラフGの接続行列A(G)は完全ユニモジュラ

Proof.

(LP)の制約条件行列Aは式(11)の通りである。

$$A = \begin{bmatrix} B_1 & & O \\ & \ddots & \\ O & & B_1 \\ \hline -B_1 & & O \\ & \ddots & \\ O & & -B_1 \\ \hline B_2 & & O \\ & \ddots & \\ O & & B_2 \\ \hline I_E & \cdots & I_E \\ \hline & C_t & \\ \hline & -C_t & \end{bmatrix} \quad (11)$$

Aの任意のk次正方部分行列Sの行列式が必ず 0,1,-1 のいずれかに成ることを示す。Sが零ベクトルを含むときSの行列式は0である。

ここではSが[B₁^t -B₁^t B₂^t I_E C_t^t -C_t^t]^tのk次正方部分行列である場合を考える。ここで、[B₁^t B₂^t]^tは時間構造化ネットワークの接続行列の部分行列に相当するため、補題 2 より[B₁^t B₂^t]^tは完全ユニモジュラである。さらに補題 1 より[B₁^t -B₁^t B₂^t -B₂^t]^tが完全ユニモジュラであるため、その部分行列である[B₁^t -B₁^t B₂^t]^tも完全ユニモジュラである。

Sは[B₁^t -B₁^t B₂^t I_E]^tの部分行列S' ∈ Z^{k×k'}と[C_t^t -C_t^t]^tの部分行列S'' ∈ Z^{k×(k-k')}を用いて式(12)のように書くことができる。

$$S = [S' S'']^t \quad (12)$$

S''の各行(各列)は要素が 1つだけ 1で残りが 0で埋められたベクトルか、零ベクトルである。従って、ラプラス変換を用いて式(13)が成立する。

$$\det S = \det S'^t \quad (13)$$

S'は完全ユニモジュラであるためにdet Sは 0, 1, -1 のいずれかであり、制約条件行列Aが完全ユニモジュラであることが示された。 ■

以上より式(1), (2), (3), (4), (5)から成る 0-1 整数計画問題(DP)の解とその線形緩和問題(LP)の解が一致することが示された。これにより多項式時間での計算が可能になる。また、組合せ爆発が発生することもないためにオークションの大規模化に対して強力である。ただし、この手法は逐次的に変化する入札情報に対して発生する再計算を一から解き直す必要がある。

3. 数値計算

数値実験は小規模なシステムを想定し、図-4に示す道路ネットワークを想定して行う。

時間構造化ネットワークに対する価値関数を推定するにあたり、dRLモデルのパラメータは簡易的に与えて計算を行った。即時効用として始点での滞在に+100、移動中での待ちに-200が与えられ、時間割引率0.8で各リンクに対する評価額は逆伝播的に計算される。

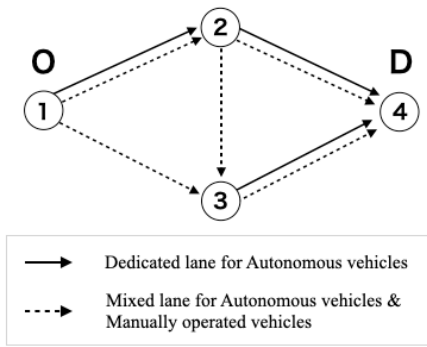
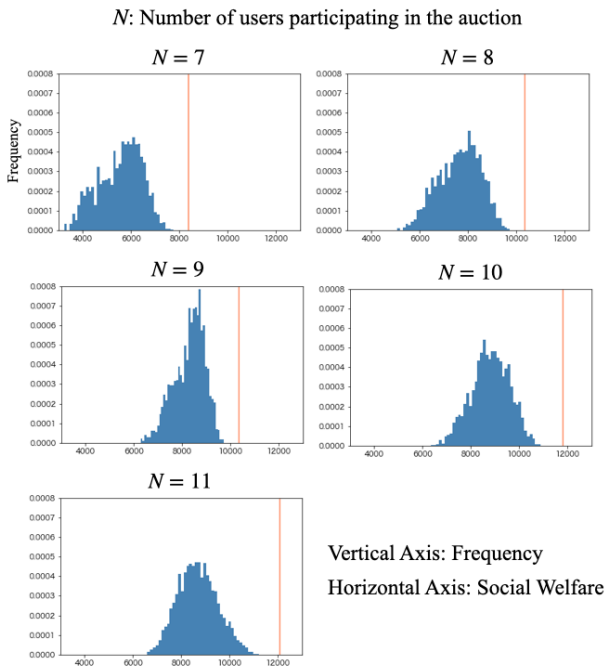


図4 数値実験で用いる道路ネットワーク



Histogram: Social welfare achieved by random allocation of permits
Red line: Social welfare achieved by scheduling auction

図5 オークション導入による社会総余剰の改善

まず、社会総余剰の観点からオークションの導入効果を確認する。道路ネットワークを自由にユーザーが利用した際に達成される社会総余剰の確率密度分布に対して、オークションを導入した際に達成される社会総余剰を比較すると、図-5の通り。なお、容量制約により通行権を割り当て移動することができる最大の人数は9人である。ネットワークの容量に対して需要量が離れている時ほどオークションの効果が見ることが確認できる。

ZDDを用いた全列挙手法と線形緩和を適用した手法の二つを、計算時間の観点から比較する。表-1のような入札が行われたオークションを考える。この時に、それぞれのオークションにおける勝者決定問題を解くのに要した時間は図-6の通り。

表-1 動的スケジューリングオークションに対する入札

timestep	user	Bid amount					
		t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10
1	0	110	120				
1	1		210	430			
1	2	320	270				
1	3	200	520				
1	4	210	300	420			
1	5		220	150			
1	6	100	240				

2	7		510	220			
2	8				230	210	150
2	9			520	610		

3	10			610	720		
3	11					210	250
3	12				320	750	510
3	13			220	320	100	

4	14					500	460
4	15				380	220	
4	16				130	300	200

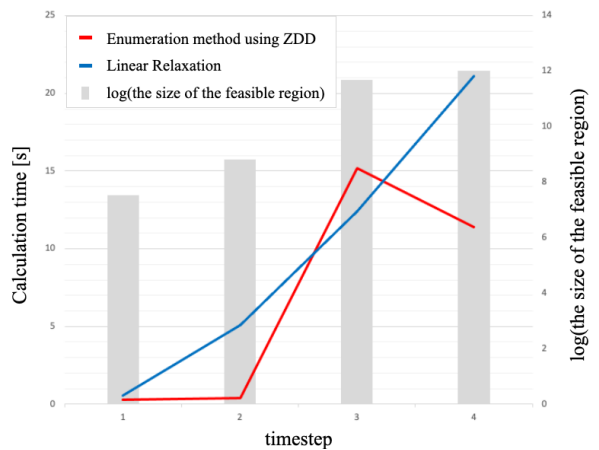


図6 動的スケジューリングオークションにおける、タイムステップごとの解空間の拡大と計算時間の変化

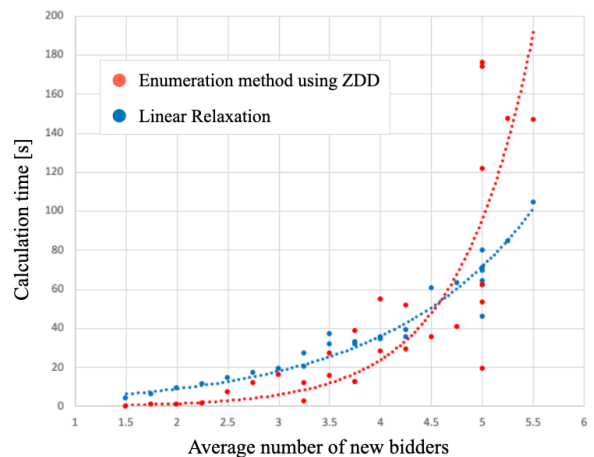


図7 動的スケジューリングオークションの規模の拡大に対する計算時間の変化

実行可能領域が拡大するにつれ、線形緩和を用いた場合は単調に計算時間が増加していくが、ZDDを用いた列挙手法は再計算に対して強力であることが確認できる。

また、システムを利用するユーザーの数の増大に伴う計算時間の変化は図-7の通り。ただし、新規入札に伴う再計算は $t = 1$, $t = 2$, $t = 3$, $t = 4$ で発生しており、縦軸が計4回の通行権最適配分問題に要した計算時間、横軸が1回あたりの平均的な新規入札者数となっている。

ZDDを用いた列挙による探索手法はシステムの規模が小規模であるうちは非常に高速に計算を行うことが可能であるが、大規模化に伴い組合せ爆発が起きてしまう。

一方、線形緩和を用いた手法は、システムが小規模なうちから一定の計算時間がかかってしまうものの、サービス規模に対して一定のスケラビリティがあることが確認できる。また、大規模計算に対応可能であるため、サロゲートモデルの学習データセットを作成する段階においても非常に有用である。

3. 数値計算

(1) 本研究の成果

本研究では自動運転車の交通流の動学的最適化の手法として、動的なスケジューリングオークションを取り入れた通行権取引制度を導入し、オークションごとに発生し、計算負荷が高い通行権最適配分問題に対する効率的な計算アルゴリズムを提案した。以下に、本研究の主な成果をまとめる。

- 1) 時空間的なエッジに対して通行権を導入することにより、交通量配分モデルに適用可能な取引モデルにした。また、dRL モデルを活用することにより、少ないユーザーの入札情報から高い精度でそれぞれの通行権に対する評価額を推定するシステムを考案した。
- 2) 動的な通行権取引モデルに対して VCG メカニズムを適用し、逐次的に発生する全てのオークションで効率性と耐戦略性が保証されることを示した。
- 3) ZDD を活用した解空間の全列挙による計算アルゴリズムを構築し、再計算に強く、動的なスケジューリングオークションに対して有効であることを示した。
- 4) 制約条件行列が完全ユニモジュラである定式化に成功したことにより、線形緩和によって大規模なオークションの計算結果も求めることが可能になった。

(2) 今後の課題

今後の課題や発展可能性としては以下が挙げられる。

- 1) 本研究では、通行権取引モデルを通じて交通量配分の最適化を考えたものである。然しながら、自動運転車両が道路ネットワークに導入された場合、道路ネットワークの車線は”自動運転車両専用車線”、”手動運転車両専用車線”、”混在車線”の三種類へと分配されると考えられるが、それらの最適な配分手法は体系化されていない。本研究で提案した通行権取引モデルは車線の最適配分を中心とした道路ネットワークの最適化に拡張可能である。
- 2) 本研究で提案した計算手法は、オークションの規模に対しての拡張性が依然低いと考えられる。逐次的に発生する需要に対して高速に解を調整する重要性は非常に高い。高速化の手法として、GCN(Graph Convolutional Network)モデル等を活用したサロゲートモデルによる近似解が挙げられる。

REFERENCES

- 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) H. Yang and X. Wang: Bisection-based trial-and-error implementation of marginal cost pricing and tradable credit scheme, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 46, No. 9, pp. 1085-1096, 2012.
- 3) 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.
- 4) T. Akamatsu and K. Wada: Tradable network permits: A new scheme for the most efficient use of network capacity, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 79, pp. 178-195, 2017.
- 5) Y. Hara and E. Hato: A car sharing auction with temporal-spatial OD connection conditions, *Transportation Research Procedia*, Vol. 23, pp. 22-40, 2017.
- 6) Y. Oyama and E. Hato: A discounted logit model for dynamic gridlock network analysis, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 85, pp. 505-527, 2017.
- 7) S. Minato: Zero-suppressed bdds for set manipulation in combinatorial problems, pp. 272-277, 1993.
- 8) D. E. Knuth: *The Art of Computer Programming Volume 4A Combinatorial Algorithms, part 1.*, Pearson Education, 2011.
- 9) 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, 2020.

(Received ?)

(Accepted ?)

APPLICATION OF A ZDD-BASED FULL ENUMERATION METHOD TO TRAFFIC FLOW OPTIMIZATION WITH DYNAMIC SCHEDULING AUCTIONS

Takuma MURAHASHI and Eiji HATO

As a method to optimize the operational efficiency of automated vehicles and ride-hailing, we propose to introduce dynamic and tradable permits on a network with a recursive structure, and apply the Vickrey-Clarke-Groves (VCG) mechanism as a method to determine the optimal allocation pattern of permits. This permit system is applicable to traffic allocation models, and is efficient and strategy-resistant. On the other hand, the dynamic scheduling problem, the problem of determining the allocation pattern of permits, is classified as NP-hard and computationally demanding, and requires recalculation due to schedule changes or new bids. In this paper, we propose a method for the full enumeration of the feasible region of variables using ZDD (Zero-suppressed Binary Decision Diagram) with structured alternatives, and show its characteristics by comparing it with the linear relaxation method.