

利用者の時間価値異質性に着目した ネットワーク課金の制度設計

早川 敬一郎¹・羽藤 英二²

¹正会員 (株)豊田中央研究所 (〒480-1192 愛知県長久手市横道 41 番地の 1)
E-mail: kei-hayakawa@mosk.tytlabs.co.jp

²正会員 東京大学大学院 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、各車両に個別の交通制御が実現可能となる将来の自動運転社会を見据えて、乗車する人々の時間価値を考慮して社会効用を最大化する交通制御手法を提案する。具体的には、適切なインセンティブを設定することで利用者自身から時間価値の情報を取得し、その情報に基づいて社会効用を最大化する交通制御を考え、これを時空間ネットワークにおける最適割当問題として定式化する。この問題はネットワーク規模に伴って計算量が非常に大きくなるため、計算コストの削減手法として、グラフ構造を圧縮表現して索引化する ZDD (ゼロサプレス型二分決定グラフ) を用いるアルゴリズムを提案する。

Key Words: 時間価値, 時空間ネットワーク, 交通制御, VCG メカニズム, ZDD, 速度制御

1. はじめに

従来の交通制御の多くは、個々の車両を区別することなく、車両の流れ全体を最適化することを目指しており、その目的関数の例としては、総旅行時間(全ての旅行者の旅行時間の合計)などが用いられてきた。このような目的関数を用いた交通制御では、そこに乗る人が急いでいるか否かといった個別の事情は考慮されない。これまでに提案されている交通制御のうちで、個々の車両を区別する交通制御の例としては、緊急車両や公共バスを優先する信号制御や、複数人乗車の車両を優遇する HOV(High-Occupancy Vehicles) レーンなどが提案されているが、これらについても、少数の特別の車両を優遇するものであり、大多数の車は「一般車」として区別なく扱われてきた。

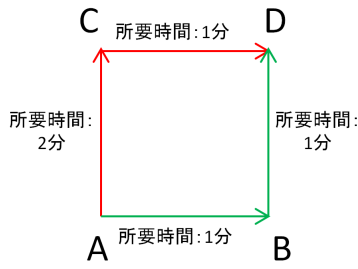
一方、全ての車両が他の車両や路側設備と情報をやり取りする将来の自動運転社会を見据えた場合には、個々の車両を区別した交通制御が実装可能となることが考えられるため、車両に乗車している人々の状況に応じて社会全体の価値を最大化する交通流制御が求められる。例えば、電力のデマンドレスポンスサービスでは、電力需要が高いときには料金を引き上げることで消費電力を平準化し、社会全体の効用を最大化している。交通においても、多少出費をしてでも急いで目的地に向かいたい人と、ゆっくりで良いから安く(または無料で)行きたい人がおり、異なる時間価値を持つ人に対してサービスと費用を差別化する交通制御が考えられる。し

かし、時間価値は旅行者本人だけが知り得る私的情報であるため、このような交通制御を実施するためには道路管理者が利用者の時間価値の情報を取得するアルゴリズムが必要である。

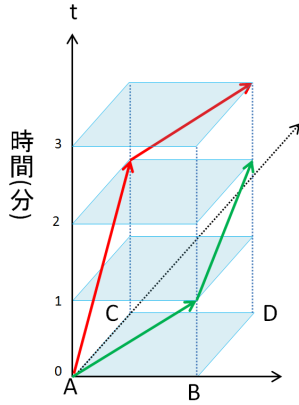
本研究では、異なる時間価値を私的情報として有する旅行者が、道路ネットワーク上を出発地から目的地まで移動する状況を考え、社会効用を最大化する交通制御を定式化するとともに、その最適化問題を低い計算コストで解くことができるアルゴリズムを提案する。

2. 既往研究

道路の通行に対して異なる価値を有する利用者に対してサービスと費用を差別化するような交通制御に関する基本的な考え方については、赤松(2007)¹⁾に詳細に示されている。和田・赤松(2011,2013)^{2),3)}は、この考え方に基づく交通制御を day-to-day の繰り返し交通に対して実行する交通制御アルゴリズムを提案している。この研究では、利用者は時間帯ごと、経路ごとに個別の私的評価額を持っていることを仮定している。しかし実際には、時間帯ごと、経路ごとの評価額は利用者自身であっても把握が困難であると考えられるため、社会への実装にあたっては少なからず課題が存在する。一方で、Yang(2011)⁴⁾は、本研究と同様に利用者の異なる時間価値を私的情報として考え、単純割り当てと交換市場の組み合わせによって交通流の最適化を目指す手法を提案している。しかし、この方法によって社



(a) 通常のネットワーク



(b) 時空間ネットワーク

図-1 時空間ネットワークにおける軌跡の表現

社会最適状態を達成するためには、総交通費用関数と一致するポテンシャル関数を構成する必要がある、その具体的なアルゴリズムについては示されていない。

これに対して本研究では、将来の自動運転社会を見据えて、交通管理者が全ての車両を個別に制御可能であるという前提の下で、利用者の私的情報として保有する時間価値の情報を引き出し、社会最適状態の交通流を達成するための交通制御の規範的なアルゴリズムを示すものである。

3. 社会最適交通制御

前章までに示した目的を踏まえて、本章では、利用者の異なる時間価値を考慮した社会最適交通制御を定式化する。

(1) 時空間ネットワーク

まず、本研究で考える時空間ネットワークについて簡単に説明する。本研究では、時間は離散時間 $t \in \{0, 1, 2, \dots, t_E\} = T$ で定義する。今、図 1(a) に示すように、地点 A から地点 D に向かって地点 B もしくは地点 C を通る二通りの経路があるネットワークについて、時刻 $t = 0$ に地点 A を出発して地点 D に向かうときの時空間経路は、図 1(b) のように示すことができる。

さらに、発生ノードと集中ノードについては、図 2

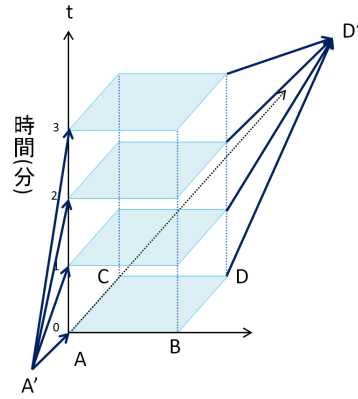


図-2 仮想リンク

に示すような仮想リンクを考える。すなわち、地点 A から発生する需要は、仮想発生ノード A' から実際の地点 A に対応する実時空間ネットワークに発生し、また地点 D に到着後は仮想集中ノード D' へと吸収される。

本研究では、このような時空間ネットワークを用いて、社会最適交通制御を定式化する。

(2) 社会最適交通制御の定式化

前節に示した時空間ネットワーク上のノード集合を V 、リンク集合を E とする。リンク集合のうち、発生ノードと集中ノードに紐づく仮想リンクの集合を $E_V \subset E$ とし、時空間上の実リンクを $E_R \subset E$ とする。すなわち、 $E = E_V \cup E_R$ である。時空間ネットワーク上の接続関係を示す変数として、 $\delta_{k,l} \in \{0, 1\}$ を用いる。リンク $k \in E$ からリンク $l \in E$ への接続が有効であれば $\delta_{k,l} = 1$ とし、無効であれば $\delta_{k,l} = 0$ とする。また、リンク $k \in E$ のリンクコストを c_k とし、交通容量を a_k とする。さらに、制御の対象となる利用者エージェントの集合を、 $I = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ とし、エージェント $i \in I$ の時間価値を v_i とする。 v_i はエージェント i の私的情報であり、交通管理者が観測することはできない。

社会最適交通制御においては、交通管理者が全ての利用者の時空間ネットワーク上の動きを決定する。この決定は、変数 $\theta_{i,k} \in \{0, 1\}$ で表され、利用者エージェント $i \in I$ が時空間ネットワーク上のリンク $k \in E$ を通過する場合には $\theta_{i,k} = 1$ とし、通過しない場合には $\theta_{i,k} = 0$ とする。このとき、利用者エージェント i の効用を u_i は、以下の式で表すことができる。

$$u_i = -v_i \sum_{k \in E} \theta_{i,k} \cdot c_k \quad (1)$$

また、社会全体の総効用 SW は、以下の式で表すことができる。

$$SW = - \sum_{i \in I} \sum_{k \in E} \theta_{i,k} \cdot c_k v_i \quad (2)$$

すなわち、時間価値が異なる利用者を考慮する社会最適交通制御は、以下のように定式化することができる。

$$\max_{\mathbf{g}} \quad - \sum_{i \in I} \sum_{k \in E} \theta_{i,k} \cdot c_k v_i \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in I} \theta_{i,k} \leq a_k, \quad \forall k \in E_R \quad (4)$$

$$\sum_{l \in E} \delta_{k,l} \cdot \theta_{i,l} = \theta_{i,k}, \quad \forall k \in E_R \quad (5)$$

$$\sum_{l \in E} \delta_{l,k} \cdot \theta_{i,l} = \theta_{i,k}, \quad \forall k \in E_R \quad (6)$$

ここで、式 (4) は、リンクのキャパシティ制約を示しており、式 (5) および (6) は時空間ネットワーク上の経路の接続制約を示している。需要やネットワークの初期条件が与えられたとき、上記の最適化問題を解くことによって、利用者ごとに異なる時間価値を考慮した社会最適交通制御を実施することができる。しかし既に述べたとおり、利用者の時間価値は私的情報であるため、この最適化問題を解くためには、交通管理者は利用者の時間価値に関する情報を入手する必要がある。その手法について、次節に詳細に示す。

(3) 道路管理者が利用者の時間価値を知るためのオークションメカニズム

本研究では、利用者の時間価値を入手する方法として、オークション理論で用いられる手法を活用する。オークション理論の一分野であるメカニズムデザインの研究⁵⁾では、利用者が私的情報を明らかにすることに対して適切なインセンティブを付与するメカニズムが研究されている。特に、利用者が私的情報を正確かつ完全に明らかにすることで最大の効用が得られるという性質は”耐戦略性”と呼ばれ、最も重要な概念と考えられている。組み合わせオークションにおいて耐戦略性を含む優れた特性を示すメカニズムとしては、VCG(Vickrey-Clarke-Groves)メカニズム^{6),7),8)}が知られている。VCGメカニズムは、全ての利用者が、自身が社会に与えた外部不経済性に相当する費用を負担するメカニズムであり、交通分野でも VCGメカニズムを適用した研究が報告されている^{9),10)}。

前節で示した問題に VCGメカニズムを適用した場合、エージェント $i \in I$ の負担する費用は次のように求めることができる。まず、エージェント i が存在しなかったと仮定した場合に、最適制御によって得られる総社会効用 SW_{-i} を以下の式で求める。

$$SW_{-i} = - \sum_{i \in I_{-i}} \sum_{k \in E} \theta'_{i,k} \cdot c_k v_i \quad (7)$$

ここで、 I_{-i} は i 以外の全てのエージェントの集合を表し、 $\theta'_{i,k}$ はこれらのエージェントに対して最適交通制御を実施した場合の時空間ネットワーク配分を示してい

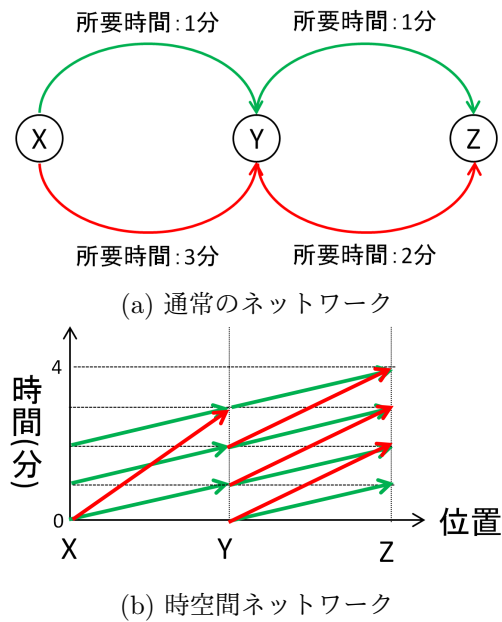


図-3 サンプルネットワーク

表-1 利用者の情報

時刻	エージェント (i)	時間価値 (v _i)	出発地	目的地
t = 0	1	10	X	Z
	2	1	X	Z
t = 1	3	20	Y	Z
	4	10	X	Z

る。このとき、エージェント i の負担する費用 x_i は、
$$x_i = \{SW_{-i} - (SW_i - u_i)\} \quad (8)$$
 となる。これは、エージェント i が社会に与えた外部費用と一致する。

(2) 節で示した最適化問題の厳密解に相当する交通制御と、本節で示した費用負担を組み合わせたメカニズムは VCGメカニズムであるため、耐戦略性が保証されている。利用者は自身の私的情報を管理者に対して明らかにすることで自身の利益を最大化することができるため、道路管理者は利用者の時間価値に関する多くの情報を得られる可能性が高い。

(4) ケーススタディ

前節までに示したメカニズムを、簡単なケーススタディで説明する。ここでは、図 3(a) のネットワークを考える。このネットワーク上で時刻 $t = 0$ 以降に地点 X もしくは地点 Y を出発し、時刻 $t = 4$ までに地点 Z に到着する全ての軌跡からなる時空間ネットワークは、図 3(b) で表すことができる。この時空間ネットワーク上の全てのリンクに関して、交通容量は 1 とする。

今、このネットワークに対して、表 1 に示す 4 エー

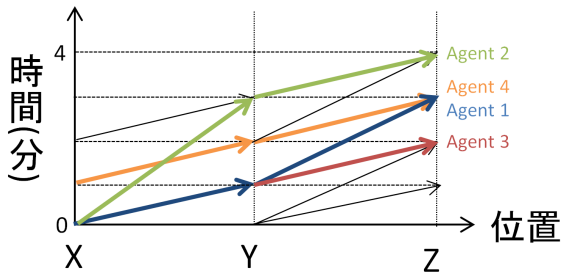


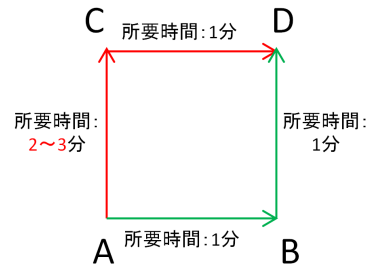
図-4 最適配分

エージェントが道路の利用意思を表明した場合について考える。このとき、(2)節で示した最適配分は図4に示す通りとなり、各エージェントの支払金額は(3)節で示した計算によって、 $x_1 = 1, x_2 = 0, x_3 = 10, x_4 = 0$ となる。時間価値が高い利用者が限界外部費用を負担することで優先的に所要時間が短いルートを使うことで総社会効用を最大化できていることが分かる。

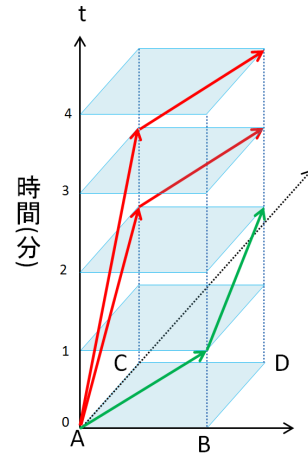
(5) 大規模問題に適用するためのアルゴリズム

上述したアルゴリズムでは、ネットワーク上の組み合わせ最適化問題を繰り返し解く必要がある。具体的には、最適配分を求めるために1回、各エージェントの支払金額を求めるために各1回、最適化問題を解く必要があり、 N 人のエージェントを対象とする場合には、合計 $N + 1$ 回の組み合わせ最適計算が必要となる。ネットワーク上の組み合わせ最適化問題は、ネットワーク規模に伴って計算量が非常に大きくなるが、メカニズムの耐戦略性を保証するためにはこれらの最適計算の厳密解を求める必要があるため、近似解を導出するヒューリスティック解法を使うことはできない。

このような最適化問題を解くためのアルゴリズムとして、ZDD (ゼロサプレス型二分決定グラフ^{11), 2)}を用いるアルゴリズムが挙げられる。この手法は、グラフ構造が与えられた時に、その中から制約条件を満たすような部分グラフ構造を全て列挙し、それらをZDDと呼ばれるデータ構造を用いて圧縮表現して索引化する技法である。ZDDは、疎な経路集合を列挙するとき効率的にデータを圧縮できること、各リンクに重みの情報を持たせることができること、圧縮状態を維持したまま演算処理が行えること、といった多くの優れた特徴を有している。本研究で考える問題においては、全エージェントに対する時空間ネットワークの割り当て問題が非常に疎なグラフ構造として表現できること、特定のエージェントのみを順次除外したほぼ同一のグラフ構造の全列挙をくりかえす必要があることなどが特徴であり、ZDDを使うことで計算を効率化できると考えられる。



(a) 通常のネットワーク



(b) 時空間ネットワーク

図-5 速度制御による時空間ネットワークの拡張

(6) 速度制御による時空間ネットワークの拡張

前節まででは、リンクコストを一定として最適化問題を考えた。しかし、将来の自動運転社会を見据えた場合、速度制御によって特定のリンクの所要時間を延ばすことで、より良い解が得られる可能性がある。例えば、図1に示すネットワークにおいて、地点Aから地点Cを結ぶリンクで速度制御を実施するとする。図5(a)に示すように、通常の所要時間は2分の同リンクで速度制御実施時の所要時間が3分であるとすると、時刻 $t = 0$ に地点Aを出発する車両にとって有効な時空間ネットワークは、図5(b)に示すようになり、図1(b)と比較してネットワークが拡張されていることが分かる。このように時空間ネットワークを拡張することで、最適化の実行可能空間を拡大することができ、より良い解を得ることができる。特定のリンクで速度制御を実施することを想定した場合の時空間ネットワークは、速度制御を実施しない場合の時空間ネットワークと非常に似たグラフ構造を持つ。このため、ZDDによる索引化を活用すれば、速度制御の効果に関する計算コストを低減することができる。

4. まとめ

本研究では、将来の自動運転社会を見据えて、異なる時間価値を持つ利用者を想定した最適交通制御アルゴリズムを示した。最適交通制御を実施するためには、まず、道路管理者は利用者の私的情報である時間価値を入手する必要がある。そのため、本研究では、耐戦略性が保証されたメカニズムによって、利用者が管理者に私的情報を正確に伝えるインセンティブ設計を行った。利用者の時間価値の情報を入手することができれば、最適交通制御アルゴリズムは時空間上ネットワーク上の組み合わせ最適化問題として表現できる。大規模なネットワークではその計算量は非常に大きくなるが、ZDDを用いることによってその計算コストを大幅に削減することができる。

参考文献

- 1) 赤松隆: 一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度, *土木学会論文集 D*, Vol.63, No.3, pp.287–301, 2007.
- 2) 和田健太郎 and 赤松隆: ネットワーク通行権取引市場のオークション・メカニズム, *土木学会論文集 D3* (土木計画学), Vol.67, No.3, pp.376–389, 2011.
- 3) Wada, K. and Akamatsu, T.: A hybrid implementation mechanism of tradable network permits system which obviates path enumeration: An auction mechanism with day-to-day capacity control, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.60, pp.94–112, 2013.
- 4) Yang, H. and Wang, X.: Managing network mobility with tradable credits, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.45, No.3, pp.580–594, 2011.
- 5) 早川敬一郎: メカニズムデザイン-win-win 関係を築く制度設計とその実用例-, *豊田中央研究所業務報告書*, p. 201512180, 2015.
- 6) Vickrey, W.: Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders, *The Journal of finance*, Vol.16, No.1, pp.8–37, 1961.
- 7) Clarke, E. H.: Multipart pricing of public goods, *Public choice*, Vol.11, No.1, pp.17–33, 1971.
- 8) Groves, T.: Incentives in teams, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 617–631, 1973.
- 9) 原祐輔 and 羽藤英二: 乗捨て型共同利用交通システムに対する利用権取引制度の設計とその解法の提案, *土木学会論文集 D3*, Vol.70, No.4, pp.198–210, 2014.
- 10) Hara, Y. and Hato, E.: A car sharing auction with temporal-spatial od connection conditions, *Transportation Research Procedia*, Vol.23, pp.22–40, 2017.
- 11) Minato, S.-i.: Zero-suppressed bdds for set manipulation in combinatorial problems, *Proceedings of the 30th international Design Automation Conference*, pp. 272–277, ACM, 1993.

(2017. 7. 24 受付)

NETWORK PRICING MECHANISM CONSIDERING VARIOUS TIME VALUE OF USERS

Keiichiro HAYAKAWA and Eiji HATO