

自動-手動走行混在流における 情報化パラドクス改善のための制度設計

林 由翔¹・羽藤 英二²

¹学生会員 東京大学 工学部社会基盤学科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: yhayashi@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

本研究は自動運転車両が高い情報認識能力を持つことに着目し、自動運転車両・手動運転車両の混在流が生じたとき、両者の間に存在する情報の非対称性が交通状態にもたらす影響を分析するものである。追越行動を逐次手番型ゲームとして記述する車線変更モデルを構築することで、将来状態の先読みと情報の非対称性を表現可能とした。

さらに上述の車線変更モデルを利用し、自動運転車両にオークションメカニズムを用いて適切なインセンティブを与えることで、交通状態を改善するメカニズムを提案する。提案メカニズムは効率性、Bayesian-Nash-Incentive-Compatibility, 中間個人合理性を備え、オークションに参加しない車両がいる混在状況について適用可能である。

Key Words: Automated vehicles, Lane change model, Extensive-form game, VCG Mechanism

1. はじめに

近年の情報処理技術の発展により、自動運転技術の実用化に向けた動きが各国で本格化している。日本においては、2023年4月にも条件付きで完全自動運転が可能なレベル4自動運転車両が解禁される見込み^{注1}となっており、関連した法整備も進められている。一方、2023年現在において道路空間を走行する自動車は手動運転車両がほとんどである。人間が自動車を運転する際には、周囲の交通状況を目視によって捉え、将来の周辺状況をある程度予測することにより、自らの効用を高めるように速度・車線を選択している。

自動運転車両が持ち得る特徴として、周辺状況に関する情報を人間より多く得られることと、協調運転が可能なが挙げられる。

周辺状況の情報に関しては、現行の自動運転車両はカメラに加えてレーザーやLiDARを搭載するのが一般的であり、人間に見えない場所の情報も得ることができる。加えて、路車間通信や車車間通信を用いれば、周辺の広範な道路状況を入手することも技術的には可能になる。自動運転車両も手動運転車両と同様に、入手した周辺情報をもとに車線変更戦略を決定するが、目視に頼る手動

運転車両よりも、センサや通信機能を持つ自動運転車両の方がより多くの情報を用いることができるだろう。

協調運転に関しては、車車間通信に基づいて車間距離を調節することで、事故リスクを低減するだけでなく交通流を安定させることもできる¹。協調運転に際しては、交通容量を拡張し、社会的厚生を最大化する手法の一つとして、通行権に関するオークションシステムの導入が考えられる。

今後、自動運転車両の普及が進む段階で、自動運転車両と手動運転車両という性質の異なる車両同士が同一の道路環境に混在することとなる。この混在流においては、車両ごとに入手できる周辺情報が異なるために情報の非対称性が発生し、それに伴って各車両の最適車線変更戦略が変動することとなる。Akerlof (1970)²は、財の取引において情報の非対称性が存在するときに市場の効率性が低下し社会的厚生が悪化する場合があることを指摘している。道路の通行権を財とみなせば、道路上においても情報の非対称性に起因する社会的厚生が悪化が起る可能性が考えられる。しかし、混在流において情報の非対称性に焦点を当てた研究は管見の限りみられず、情報の非対称性がもたらす影響への理解が進んでいるとは言えない。

本研究では、2車線の単路において自動運転車両と手動運転車両が混在する状況を想定し、複数の車両が追い越しを企図する状況を評価する車線変更モデルを提案する。このモデルのもとで、情報の非対称性に起因する各車両の最適戦略の変化を表現し、それに伴う道路利用状況の変化をシミュレーションすることで、情報の非対称性が混在流にもたらす影響を考察する。加えて、自動運転車両が協調して避走や追い越しを行うことにより社会的厚生改善を図るオークションメカニズムを提案し、数値実験を通じて提案メカニズムの有用性を確認する。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

(1) 車線変更モデル

単路における車線変更モデルは Gipps(1986)³⁾のギャップ受け入れモデルに端を発し、自車に隣接する進入可能な車間ギャップに対して車線変更の是非を判定するモデルとして定式化された。Yang&Koutsopoulos(1996)⁴⁾は高速道路に Gipps のモデルを適用し、大規模なマイクロ交通シミュレーションモデルを実装した。現実の車線変更行動では、自車近傍の将来状態をある程度予測し、それに合わせて自車の車線変更戦略を決定していると考えられる。Toledo ら(2007)⁵⁾はこの点に着目し、まず目的車線を選択し、次に複数の進入可能なギャップの中から目的ギャップを選択したのち、それに合わせて加減速を行う3段階からなるモデルを提案している。

これらの車線変更モデルでは、近傍車両の位置・速度の情報をもとに車線変更可否を決定しているが、いずれのモデルも自車以外の車両は同じ車線を走行し続けることを仮定しており、車線変更を企図する車両が複数いる状況は表現できていない。しかし現実には、車線変更を企図する車両が複数いた場合に、希望する車線変更・加減速ができないという現象が起こりうる。このような現象を評価するには、単に後方のギャップを探索するのではなく、後方車両の車線変更まで含めた戦略を推論する必要がある。

車線減少部における車両の合流を扱うモデルでは Kita(1999)⁶⁾や Fukuyama(2020)⁷⁾が、逐次手番型ゲームを用いて他車の車線変更戦略を推論しあう状況を表現したモデルを提案している。しかし、これらのモデルは合流部における2台の車両の相互作用にのみ着目するものであり、単路における多数の車両の相互作用については扱っていない。

(2) 通行権取引

道路交通においては、各車両が一定の道路空間を占有するために、常に他車に対して負の外部性を生じる。こ

の外部性を内部化し、社会的厚生を最大化するための手法の一つとして、各車両が時空間ネットワーク上を移動する通行権を取引させる制度が多数提案されている。出発時刻選択行動のシフトを狙った制度として、Akamatsu ら(2006)⁸⁾は特定の時刻に特定のボトルネック地点を通過する権利を市場で取引するボトルネック通行権取引制度(Tradable bottleneck permits; TBP)を提唱し、その後 Sakai ら(2015)¹⁰⁾、Akamatsu & Wada ら(2017)¹¹⁾によって拡張されている。経路選択行動のシフトを狙った制度として、Yang & Wang(2011)¹²⁾は市場で取引可能なクレジットをドライバーに付与し、リンクごとにクレジットを徴収する取引可能クレジット制度(Tradable credit schemes; TCS)を提唱し、その後 Tian ら(2013)¹³⁾や Gao ら(2019)¹⁴⁾によって拡張されている。

Wada & Akamatsu(2010)¹⁵⁾¹⁶⁾はTBPを具体的に実装するために、組み合わせオークションのメカニズムであるVCGメカニズム¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾を用いた通行権市場の設計方法を提案した。

VCGメカニズムを用いることで、通行権の最適配分が可能となる一方で、本研究で対象とするような自動運転・手動運転混在状況に対してVCGメカニズムを含むオークションメカニズムを適用した研究はみられない。

(3) 本研究の位置づけ

本研究では、まず複数の車両が追い越しを企図する状況を評価し、次にオークションメカニズムを用いて追い越し行動に対する課金を行うことで道路の利用効率を改善する手法を提案する。提案するモデルは、加速度や反応遅れ項といったマイクロな要素を考慮しない代わりに、3台以上の複数の車両の前後関係の遷移を対象とする、メソスケールな車線変更モデルである。このようなモデルを考えることで、現実的な計算時間の下でドライバーの数十秒～数分程度の中期的な戦略を表現することができる。各車両が到着時刻を最も早める、つまり期待効用を最大化するにあたって、選択する戦略は入手できる周辺情報の量によって変化すると推測されることから、目視に基づき近傍の情報のみを入手できる手動運転車両と、センサー等で広範囲の情報を入手できる自動運転車両との間には情報の非対称性があると考えられる。本研究ではこうした異質性を持つ手動運転車両と自動運転車両が混在する状況において発生する現象を評価する。

追い越し行動に対する課金は、道路空間の通行権を商品とみなした組み合わせオークションによって実現できる。このとき課金は、機械的に車線変更を実施する自動運転車両にのみ実装可能である。従って混在流では、課金に参加しない手動運転車両によるランダムな割り込みが逐次発生すると考えるべきである。従前のオンラインオークションメカニズムでは将来効用の不確実性は織

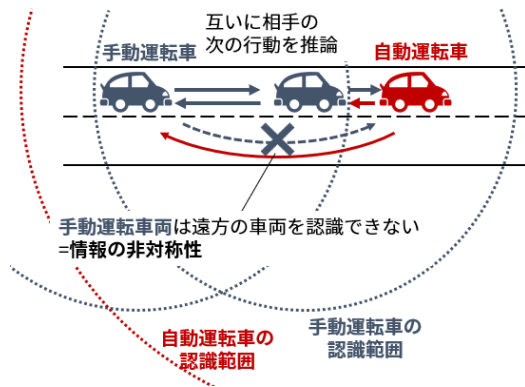


図-1 提案モデルにおける情報の非対称性の表現

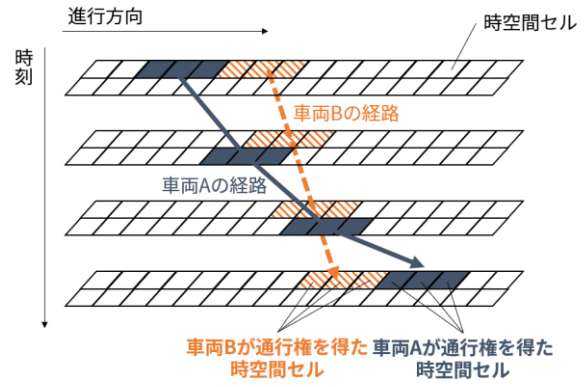


図-2 時空間セル上での通行権

り込み可能であるものの、獲得した商品をメカニズムの介入なしに奪われる状況、すなわち割り込みは表現することができない。本研究ではこのような割り込みを織り込んでオークション支払額を更新するオークションメカニズムを提案し、メカニズムが持つ性質を示す。

3. システムのフレームワーク

本章では車両同士の相互作用及び情報の非対称性を考慮した車線変更モデルを提案するとともに、オークションメカニズムを利用して自動運転車両に協調運転をさせることで社会的厚生を改善させる手法を示す。

(1) 利己的な車線変更モデル

全ての車両は、周辺車両の車線変更行動を予測することにより、自車にとって最適な車線変更行動を決定する。このような状況を Kita(1999)⁶ に倣い逐次手番型ゲームとして記述する。本研究ではこれに加え、車両の期待効用には誤差項が生じるものと考え、Fosgreau ら(2013)²⁰ の RL モデルに倣ってロジット型の選択構造を仮定した逐次手番型 RL モデルを提案する。

各車両はそれぞれ固有の希望速度 v 、時間価値 p をもつ。時刻 0 から時刻 t までにある車両が距離 l だけ進んだときの効用 V は以下のように表されるものとする。

$$V = \left(\frac{l}{vt} \right) \quad (1)$$

すなわち、車両の平均速度に比例して $0 \leq V \leq p$ の間で効用が変化するものとする。

ある車両 A が前の車両に追いつくか、後の車両に追いつかれたとき、車両 A は車線変更を行うかどうかを決定する。もとの周辺車両群の位置関係を状態 k 、車両 A が車線変更を選択したときの位置関係を状態 g 、しなかった場合を状態 f とおく。このとき車両 A の状態 k における効用関数 $V_{A,k}$ は、以下のように即時効用 u および誤差項 ε を用いて記述できる。

$$V_A(k) = E[\max(u_A(g|k) + V_A(g) + \varepsilon_g, u_A(f|k) + V_A(f) + \varepsilon_f)] \quad (2)$$

選択確率 $p_A(g|k)$ がロジット型であることを仮定すると、 $p_A(g|k)$ は以下の通り。

$$p_A(g|k) = \frac{\exp(u_A(g|k) + V_A(g))}{\exp(u_A(g|k) + V_A(g)) + \exp(u_A(f|k) + V_A(f))} \quad (3)$$

ここで Fosgreau らの RL モデルと異なる点として、車両 A の行動による状態遷移先 g, f において、次に車線変更の選択を行うのが車両 A とは限らない。状態 g において選択を行うのが車両 A とは異なる車両 B だった場合、 g からのさらなる遷移先を g', f' として、

$$V_A(g) = p_B(g')V_A(g') + p_B(f')V_A(f') \quad (4)$$

となる。(4)式が他車の車線変更行動を推論することに対応する。

p_B は車両 B の車線変更確率であり、(2)式と同様に計算できる。また、全ての車両が速い順に並ぶまで追い越しを繰り返せばそれ以上追い越しは起こらないから、終状態は必ず存在する。従って終状態からさかのぼって全車の全状態における価値関数を計算可能である。

自動運転車両はモデル内の全車の車線変更行動を予測するのに対し、手動運転車両は近傍の一定範囲内にいる車両の車線変更行動のみを予測する。このため手動運転車両は真の最適戦略とは異なる戦略を取る場合がある。図-1 は提案モデルにおける情報の非対称性の表現方法を示したものである。

(2) 割り込み許容時空間セルオークション

上述の車線変更モデルにおいては自動運転車両も利己的にふるまう。そこで一部または全部の自動運転車両に対して、適切な金銭的インセンティブを与えることで、社会的厚生を最大化するような戦略をとらせるようにす

るメカニズムを提案する。

a) オークションメカニズム

Murahashi & Hato(2022)²⁰を参考に、道路上の離散化した座標集合を時間方向に拡張した時空間セルを考える。車両は複数の時空間セルの通行権を確保することで通行経路を決定する(図-2)。そこでこの時空間セルをオークションの商品とみなし、各プレイヤーに時空間セルの組み合わせに対して入札させる組み合わせオークションを適用することを考える。

本研究では、組み合わせオークションの代表的なメカニズムである VCG メカニズム¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾をベースとして、オークションに参加しない車両もいる混在状況でも適用可能なメカニズムを提案する。オークションに参加しない車両の行動次第でオンラインに経路配分を決定する必要があることから、Parkes(2003)²⁰に倣い、支払額の計算の一部において事後的な社会的厚生ではなく期待社会的厚生を用いる。提案するメカニズムは以下の 4 ステップからなる。

- 1) オークション参加車両は時空間セルの組み合わせ(経路)に対して入札を行う。
- 2) 道路管理者が入札額をもとに最適な時空間セルの配分を決定する。
- 3) オークション参加車両は、配分された経路の通りに経路を選択できない場合がある。なぜならばオークション不参加車両はオークションと無関係に経路を決定するからである。オークション不参加車両に割り込まれた場合、最適経路の再計算・配分が行われる。
- 4) 最終的に実現された経路をもとに、VCG メカニズムに従って各プレイヤーの支払額を決定する。プレイヤー*i*の支払額 p_i は以下の通り。

$$p_i = b_{i,t_i} - W(b) - E[W(b_{-i})] \quad (5)$$

ただし $W(b)$ は実際に最終的に達成された社会的厚生であり、入札額ベクトル \mathbf{b} の関数である。 $E[W(b_{-i})]$ はプレイヤー*i*を除く全プレイヤーがオークションに参加する場合に達成される期待社会的厚生である。

b) 期待社会的厚生最大化問題

提案メカニズムの 2)および 3)では道路管理者が期待社会的厚生を最大化する経路を計算する必要がある。ここで、時空間セルベースの定式化は、4(1)節で述べた車両順序ベースの定式化を緩和したものとなっている。したがって時空間セルベースの定式化でオークションを定義しても、最適車線変更問題の解法には 4(1)節で述べた車両順序ベースの解法を利用することができる。

状態*k*において、車両 A 自らに手番があるときの効用 $V_A(k)$ は式(2)で表された。自車が手動運転車両であり、自車の期待効用を最大化する場合は車線変更確率がロジット型の式(3)で表されたが、オークションに参加する車両は自らの期待効用ではなく期待効用の総和を最大化するため、式(3)の代わりに以下の通り書き換えれば良い。

$$p_A(k) = \begin{cases} 1 & (u_A(g|k) + V_A(g) \geq u_A(f|k) + V_A(f)) \\ 0 & (u_A(g|k) + V_A(g) < u_A(f|k) + V_A(f)) \end{cases} \quad (6)$$

式(4)と同様の議論により価値関数および最適戦略を再帰的に計算可能である。

c) メカニズムの性質

提案する割り込み許容時空間セルオークションは、もとの VCG メカニズムが満たす性質のうち、効率性、Bayesian-Nash-Incentive-Compatibility(BNIC)、中間個人合理性を満たす。効率性と BNIC により、利己的なプレイヤーであっても社会的厚生最大化のためにオークション結果に従うのが最適戦略となることが保証される。また中間個人合理性により、オークションに参加した方が常にプレイヤーの余剰が大きくなることが保証される。以下にこれらの性質の証明を示す。

定理 1. 割り込み許容時空間セルオークションは効率性を満たす。すなわち、社会的厚生を最大化するようなオークション配分結果が達成される。

証明. プレイヤー*i*が最終的に通行した時空間セル集合が t_i であったとき、式(4.2)より、プレイヤー*i*の余剰 U_i は以下の通り。

$$\begin{aligned} U_i &= u_{i,t_i} - p_i \\ &= u_{i,t_i} - b_{i,t_i} + W(b) - E[W(b_{-i})] \\ &= \sum_j u_{j,t_j} - \sum_{j \neq i} u_{j,t_j} - b_{i,t_i} + W(b) - E[W(b_{-i})] \end{aligned} \quad (7)$$

ただし u_{A,t_A} はプレイヤーAにとっての時空間セル集合 t_A の真の評価額である。

プレイヤーは余剰の最大化を行う。ここでプレイヤー*i*以外の全てのプレイヤーが時空間セル集合に対する自らの効用を正直表明すること、すなわち $b_{-i} = u_{-i}$ であることを仮定する。すると $W(b) = W([b_i, b_{-i}]) = \sum_{j \neq i} u_{j,t_j} + b_{i,t_i}$ となることから、式(7)はさらに変形できる。

$$U_i = \sum_j u_{j,t_j} - E[W(b_{-i})] = W(u) - E[W(b_{-i})] \quad (8)$$

表-3 車両配置の初期設定

車両 ID	初期位置	希望速度
1	0	1
2	-5	1
3	-10	2
4	-15	2
5	-20	2
6	-25	3
7	-30	3
8	-35	3

表-5 車両配置の初期設定

車両 ID	初期位置	希望速度
1	0	1
2	-5	1
3	-10	2
4	-15	2
5	-20	3
6	-25	3

手動運転車両の認識可能距離は7に固定.

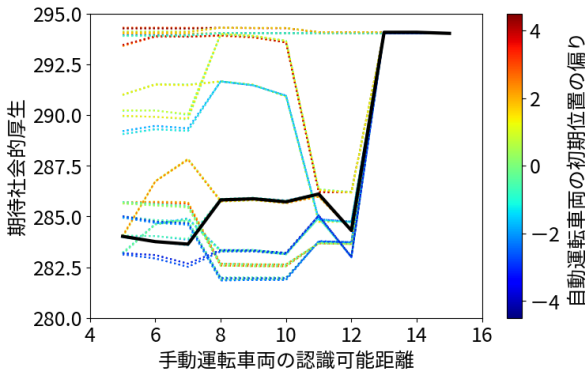


図-4 自動運転車両-手動運転車両混在状況の社会的厚生
黒太線が全車手動運転車両.

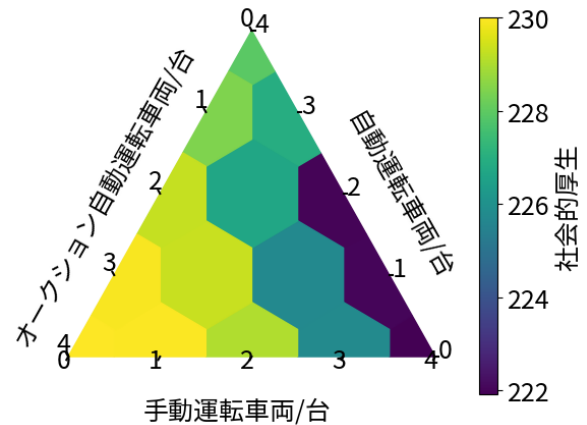


図-6 オークション参加-不参加混在状況の社会的厚生

式(8)の第2項 $E[W(b_{-i})]$ は*i*の入札に依存しないことから、プレイヤー*i*の余剰最大化戦略は(8)式第1項の最大化、すなわち社会的厚生を最大化となる。

定理 2. 割り込み許容時空間セルオークションは Bayesian-Nash-Incentive-Compatibility (BNIC) を満たす。すなわち、プレイヤー*i*以外の全てのプレイヤーが自らの効用を正直表明するとき、プレイヤー*i*も自らの効用を正直表明するのが最適戦略となる。

証明. 式(8)第1項 $W(u)$ は実現される社会的厚生を最大値であることから、事前にどのように入札しても期待社会的厚生が $W(u)$ の期待値を越えることはない。ゆえにプレイヤー*i*は u_i を正直に入札するのが最適。

定理 3. 割り込み許容時空間セルオークションは中間個人合理性を満たす。すなわち、あるプレイヤーがオークションに参加することによって得る期待効用が、参加しなかった場合の期待効用を常に下回らない。

証明. 余剰 U_i の期待値が非負であることを示せばよい。式(8)より、余剰の期待値 $E[W(U_i)]$ は以下の通り。

$$\begin{aligned}
 E[W(U_i)] &= E[W(u)] - E[W(b_{-i})] \\
 &= E[W(b)] - E[W(b_{-i})]
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

従って式(9)の第1項 $E[W(b)]$ が第2項 $E[W(b_{-i})]$ を

下回らなければよい。ここで、第1項 $E[W(b)]$ はプレイヤー*i*がオークションに参加した場合に達成される期待社会的厚生、第2項 $E[W(b_{-i})]$ はプレイヤー*i*がオークションに参加しなかった場合に達成される期待社会的厚生であり、プレイヤー*i*以外のプレイヤーのオークション参加状況は共通している。このとき、もしプレイヤー*i*がオークションに参加していたとしても、全てのオークション参加プレイヤーは $W(b_{-i})$ を達成するような経路と全く同じ経路を選択することができ、期待社会的厚生 $E[W(b_{-i})]$ を達成することができる。ゆえに $E[W(b)]$ は $E[W(b_{-i})]$ を下回らない。

5. 数値実験

(1) 自動運転車両-手動運転車両の混在状況

この節では、全車両の戦略を推論することができる自動運転車両と、近傍車両の戦略のみを推論できる手動運転車両との混在状況についてシミュレーション結果を確認する。車両の初期設定は表-3の通り。この設定のもと、各車両について自動運転車両と手動運転車両のどちらにするかを変更し、全組み合わせ $2^8 = 256$ 通りについて実現される社会的厚生をシミュレーションした。

計算結果が図-4である。「初期位置の偏り」は自動運転車両が前方に固まっているほど小さい値をとる指標。

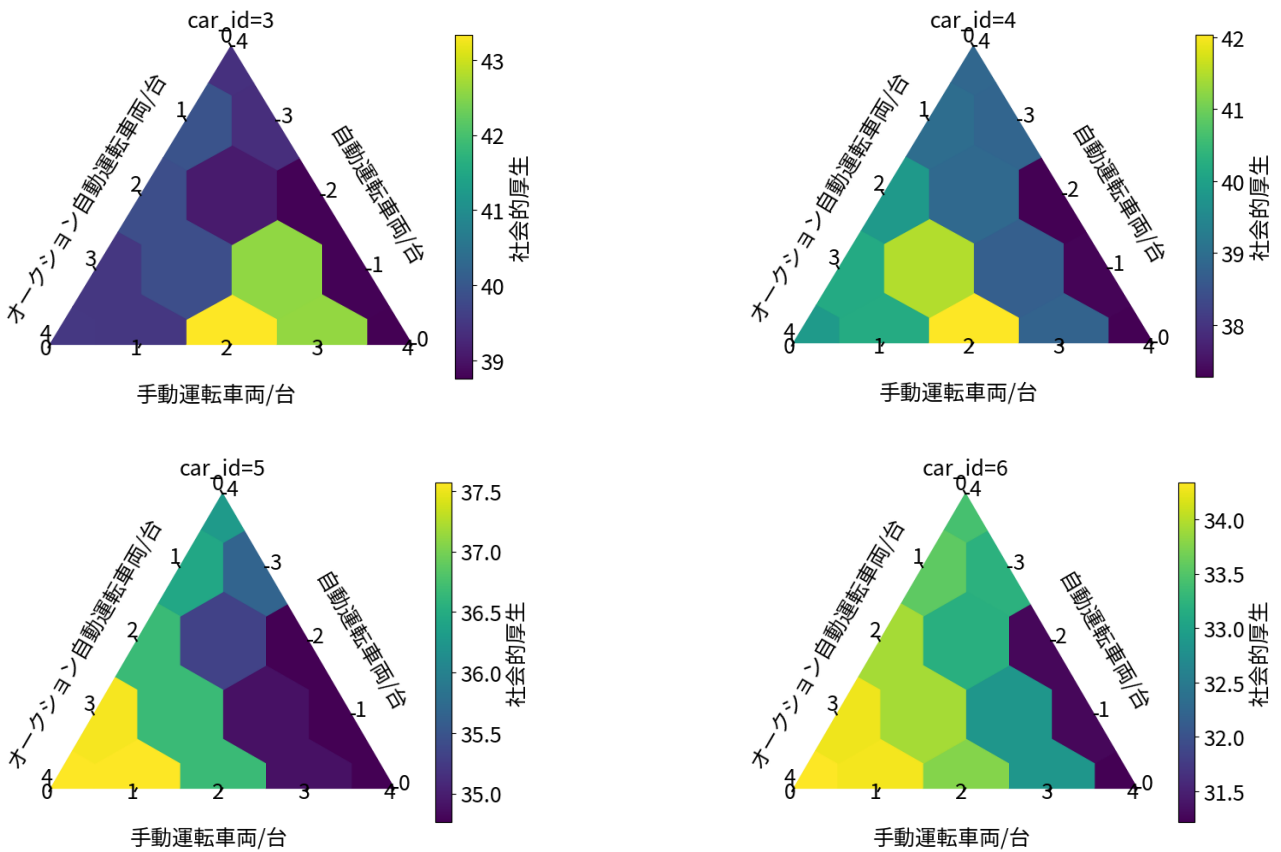


図-7 オークション参加-不参加混在状況の各車両の効用

である。「手動運転車両の認識可能距離」は、短いほど自動運転車両-手動運転車両の情報の非対称性が強い状況だと言える。初期状態において自動運転車両が前方に固まっている場合、社会的厚生が低下する傾向にあり、特に全車手動運転の場合よりも社会的厚生が悪化する場が確認された。

車線変更行動においては、前方にいる車両ほど行動の選択肢が多くなる。このため前方の自動運転車両と後方の手動運転車両の間に情報の非対称性が生じた場合に、前方の自動運転車両がより利己的な行動をとりやすくなり、結果的に社会的厚生の低下につながっているものと考えられる。

自動運転車両と手動運転車両の混在状況が実現したときに、道路管理者による制御なしに全ての車両が利己的にふるまうと、現状よりも交通状態が悪化する場合があることが示された。

(2) オークション参加自動運転車両と不参加手動運転車両の混在状況

この節では、オークションに参加する自動運転車両と、参加しない手動運転車両との混在状況についてシミュレーション結果を確認する。車両の初期設定は表-5の通り。この設定のもと、追い越し行動を行わない低速車を除いた各車両について、手動運転車両、自動運転車両、オークション参加自動運転車両のどれにするかを変更し、全組み合わせ $3^4 = 81$ 通りについて実現される社会的厚生をシミュレーションした。

まず期待社会的厚生について計算する。計算結果は図-6の通りとなった。割り込み許容時空間セルオークションは効率性を満たすため、オークションに参加する車両が多いほど期待社会的厚生が改善される。数値実験においても確かに全車オークションに参加する状況で最も社会的厚生が高く、全車手動運転の状況で最も低くなっている。

続いて各車両の期待効用に注目する。計算結果は図-7の通りとなった。

初期状態において後方にいる車両 ID 5, 6 では、オークション自動運転車両が多くなるほど自車の効用も高くなる傾向が確認される。一方で初期状態において前方にいる車両 ID 3, 4 では、全ての車両がオークション参加自動

運転車両のときに自車の効用が最大になるとは限らない。

前章で示した中間個人合理性は、各車両にとってオークションに参加しないよりも参加した方が期待効用が高くなることを意味するものである。したがって各車両にとってオークションに加入することへのインセンティブが常に存在する。一方で、他車がオークションに新たに参加したときに自車の効用が低下しないことまでは保証されない。車両 ID 3,4 において、全ての車両がオークション参加自動運転車両のときに自車の効用が最大にならなかったのはこのためだと推測される。

6. 結論

(1) 本研究の成果

本研究では自動運転車両・手動運転車両の混在状況が生じる将来の道路を想定し、混在流における車線変更行動を表現するモデルを提案するとともに、オークションメカニズムによる道路運用効率の改善手法を提案した。

まず道路の周辺状態の遷移を逐次手番型ゲームとして記述し、ゲーム内での各車両の戦略を確率的に決定するモデルを提案した。この際に各車両が利用できる周辺情報には差があることから、この情報の非対称性が交通状態にもたらす影響について考察した。シミュレーションの結果、手動運転車両と自動運転車両の混在状況では、初期状態において前方にいる車両が自動運転車両となった場合に逆選抜現象が発生し社会的厚生が低下することが確認された。このことは、より多くの情報を入手できる自動運転車両が道路空間に導入されたとき、自動運転車両が利己的に振る舞うと、手動運転のみの状況よりも社会的厚生が低下する可能性があることを意味する。

加えて本研究では自動運転車両がオークションに参加し、通行権取引を行って最適経路を利用するオークションメカニズムを提案した。提案メカニズムは、VCG メカニズムを拡張し、オークションに参加しないエージェントがいる混在状況に対応したメカニズムである。提案メカニズムでは元の VCG メカニズムが満たす性質のうち、効率性、Bayesian-Nash-Incentive-Compatibility (BNIC)、中間個人合理性が引き続き保証されることを示した。またシミュレーションにおいても、オークションメカニズムの導入によってオークション参加車両・不参加車両の混在状況でも確かに社会的厚生が改善されることが確認された。

(2) 今後の展望

本研究では複数の車両の順序関係を扱うメソスケールな車線変更モデルを提案した一方で、従来のマイクロな車線変更モデルで主題とされてきた加速度制御や反応遅れ

項については省略している。このため現実の交通シミュレーターなどに搭載するには、提案したメソスケール車線変更モデルと既存のマイクロな車線変更モデルを組合せた二段階最適化モデルとして導入する必要がある。

本研究は道路交通でみられる情報の非対称性といった構造やオークションメカニズムの導入可能性について論じたものであり、提案した車線変更モデルに対して実データを用いた推定は行っていない。しかし、現実の車線変更行動を表現するには、路側カメラの画像情報等を用いて実際の道路状態を取得し、それをもとに提案した車線変更モデルのパラメータ推定を行う必要がある。加えて、本論文で提案した車線変更モデルのベースである RL モデルは Fosgreau らの提案以降に様々な拡張がなされており、将来効用の不確実性を表現するために時間割引率を導入する²⁾など、交通シミュレーターなどに搭載する上では提案モデルに対する拡張の余地は大いにあると言える。

NOTES

注1) 日本経済新聞電子版。「自動運転レベル 4、23 年 4 月公道走行解禁へ 無人バス想定」.2022 年 10 月 27 日配信。

<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUE262U50W2A021C2000000/>

REFERENCES

- 1) Vicente Milanés, Steven E. Shladover, John Spring, Christopher Nowakowski, Hiroshi Kawazoe, and Masahide Nakamura. Co-operative adaptive cruise control in real traffic situations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol 15(2), pp 296–305, 2014.
- 2) George A. Akerlof. The market for“lemons”: Quality uncertainty and the market mechanism. *Quarterly Journal of Economics*, vol 84, pp 488–500, 1970.
- 3) P. G. Gipps. A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol 20, pp 403–414, 1986.
- 4) Qi Yang and Haris N. Koutsopoulos. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol 4, pp 113–129, 1996.
- 5) Tomer Toledo, Haris N. Koutsopoulos, and Moshe Ben-Akiva. Integrated driving behavior modeling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol 15, pp 96–112, 2007.
- 6) Hideyuki Kita. A merging – giveway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol 33(4), pp 305–312, 1999.
- 7) Sachiyo Fukuyama. Dynamic game-based approach for optimizing merging vehicle trajectories using time-expanded decision diagram. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol 120:11 2020.
- 8) Shinichi Minato. Zero-suppressed bdds for set

- manipulation in combinatorial problems. *Proceedings - Design Automation Conference*, pages 272–277, 1993.
- 9) Takashi Akamatsu, Shintaro Sato, and Long Xuan Nguyen. 時間帯別ボトルネック通行権取引制度に関する研究. 土木学会論文集D, vol 62, pp 605–620, 2006. [Takashi Akamatsu, Shintaro Sato, and Long Xuan Nguyen. Tradable time-of-day bottleneck permits for morning commuters. *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers D*, vol 62, pp605–620, 2006.]
 - 10) Katsuya Sakai, Takahiko Kusakabe, and Yasuo Asakura. Analysis of tradable bottleneck permits scheme when marginal utility of toll cost changes among drivers. *Transportation Research Procedia*, vol 10, pp 51–60, 2015.
 - 11) Takashi Akamatsu and Kentaro 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.
 - 12) Hai Yang and Xiaolei Wang. Managing network mobility with tradable credits. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol 45, pp 580–594, 2011.
 - 13) Li-Jun Tian, Hai Yang, and Hai-Jun Huang. Tradable credit schemes for managing bottleneck congestion and modal split with heterogeneous users. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol 54, pp 1–13, 2013.
 - 14) Gao, Xin Min Liu, and Chuan Xiang Ren. An average cost pricing method on electric tradable credits scheme in traffic management. *IEEE Access*, 7:57276–57283, 2019.
 - 15) Kentaro Wada and Takashi Akamatsu. 単一ボトルネックにおける渋滞と混雑を解消する情報効率的メカニズムの設計. 土木学会論文集D, vol 66, pp 160–177, 2010. [Kentaro Wada and Takashi Akamatsu. An E-market mechanism for implementing tradable bottleneck permits. *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers D*, vol 66, pp 160–177, 2010.]
 - 16) Kentaro Wada and Takashi Akamatsu. 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, 12 2013.
 - 17) William Vickrey. Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders. *The Journal of Finance*, vol 16, pp 8–37, 1961.
 - 18) Edward H. Clarke. Multipart pricing of public goods. *Public Choice*, vol 11, pp 17–33, 1971.
 - 19) Theodore Groves. Incentives in teams. *Econometrica*, vol 41, pp 617–31, 1973.
 - 20) Mogens Fosgerau, Emma Frejinger, and Anders Karlstrom. A link based network route choice model with unrestricted choice set. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol 56, pp 70–80, 2013.
 - 21) Takuma Murahashi and Eiji Hato. Sequential optimization for spatiotemporal edge auctions based on complete enumeration using zdd. *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2022, pp 3374–3379.
 - 22) David C. Parkes and Satinder Singh. An mdp-based approach to online mechanism design. *In Advances in Neural Information Processing Systems*, 2003.
 - 23) Yuki Oyama and Eiji Hato. A discounted recursive logit model for dynamic gridlock network analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol 85, pp 509–527, 12 2017.

MECHANISM DESIGN FOR IMPROVING INFORMATIZATION PARADOX IN MIXED FLOW OF AUTOMATIC AND MANUAL VEHICLES

Yuito HAYASHI and Eiji HATO

This study focuses on the high information recognition capability of automated vehicles and analyzes the effect of information asymmetry between automated and manually operated vehicles on traffic conditions when there is a mixed flow of these two types of vehicles. By constructing a lane change model that describes the overtaking behavior as a extensive-form game, it is possible to express the anticipation of future states and the asymmetry of information.

Furthermore, using the lane change model described above, we propose a mechanism to improve the traffic condition by providing appropriate incentives to the automated vehicles through an auction mechanism. The proposed mechanism has efficiency, Bayesian-Nash-Incentive-Compatibility, and intermediate individual rationality, and is applicable to mixed situations where some vehicles do not participate in the auction.