

# ミクロ交通流シミュレータへのCAV挙動の実装

## Implementing CAV Behavior on the Micro-Traffic Simulator

稲葉陽樹<sup>1)</sup>, 藤井秀樹<sup>2)</sup>, 吉村忍<sup>3)</sup>

Haruki Inaba, Hideki Fujii and Shinobu Yoshimura

1) 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: h.inaba@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 博(環境) 東京大学大学院工学系研究科 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

3) 工博 東京大学大学院工学系研究科 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

Autonomous Vehicles (AV) and connectivity technologies have been on the rise these days. On April 1<sup>st</sup>, 2023, LEVEL4 AV has been legalized to drive on public road in Japan. AV has a lot of features to contribute to social problems such as social welfare for vulnerable road users, lack of labor force, and alleviation of traffic jams etc. In this study, the mixed-Autonomy condition: an environment that both AV and Human-Driven Vehicles run around the network, is in focus. To evaluate the influence of CAV on the traffic network, altruism in the route choice process is implemented on the microscopic traffic simulator.

**Key Words :** Connected-Autonomous Vehicle, Micro-Traffic Simulator, Mixed-Autonomy

### 1. はじめに

日本では2023年4月1日に改正道路交通法が施行され、自動運転レベル4の公道走行が解禁された。近年は自動車業界の100年に一度の大変革期と言われ、CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electronic) の4つの要素が注目を浴びている。本論文ではコネクテッド技術を活用する自動運転車両 (Connected Autonomous Vehicle, CAV) を対象とする。

自動運転車の普及により期待される効果には、自家用車に代わる交通弱者の移動手段になるという社会福祉の側面、路面状況を踏まえた運転や運転行動の標準化といった制御・安全の側面、人件費削減・人手不足解消といった経済的側面・交通容量増加による渋滞削減などの交通インフラの効率化の4つが考えられる。このうち交通インフラの効率化に関しては、車間距離を極めて小さくして一つの隊列として振る舞うプラトーン走行の実現によって交差点容量が増加し、都市部の交通量を倍増させられるとする先行研究[1]があり、この他にも自動運転車の優れた特性によって交通のパフォーマンスが向上するとする研究は数多く存在する。

一方で、Wu et al. [2] や Di et al. [3] は自動運転車の普

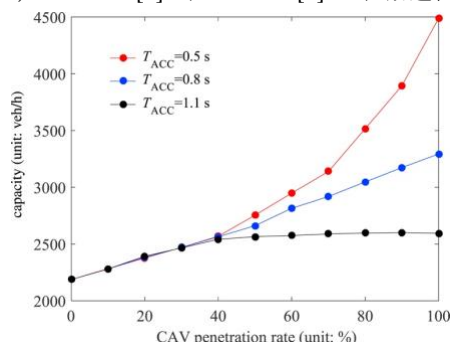


図-1 CAV 普及率と交通容量の関係 [4]

及率が低く人が運転する手動運転車が混在している環境 Mixed-Autonomy [2] についても研究しており, Ye et al. [4] では, セルオートマトンの一種である TSM (Two-state Safe-speed Model) に対し ACC (Adaptive Cruise Control) による車間距離の短縮効果と狭域通信 (Detected Short-Range Communication, DSRC) による認知可能距離の拡大のメカニズムを反映させ, CAVの普及率が30%を超えるとネットワークのパフォーマンスが普及率向上にほぼ比例して向上することが示された (図1)。

以上はミクロな観点での効果の整理であるが, 経路選択行動というマクロな観点においてもCAVは交通ネットワークの効率向上に貢献する可能性があることがわかっている。例えば, 自動運転車に乗る人の時間価値が低いという特徴を考慮したときに User Equilibrium と System Optimum の関係性がどう変化するかについてまとめた先行研究[5]や, マクロな経路選択結果を運転手間のナッシュ均衡として考えてCAVに利他性を持たせて手動運転車よりもコストの大きい経路に分配することで安定しロバストで社会的コストも小さい状態を実現することができるとする研究[6]もある。

本研究では, 高速道路等の簡単な環境で行われていた CAV挙動の交通ネットワークへの影響評価を, 市街地を含む複雑かつ現実的な環境にまで拡張し, 次世代交通の可能性について示すことを目的とする。そのための最初の一步として本論文では, CAVにより実現されると考えられる利他性を表現する経路選択行動の実装に取り組んだ。

### 2. ミクロ交通流シミュレーションの概要

#### (1) ADVENTURE Mates

本研究ではミクロ交通流シミュレータとして

ADVENTURE\_Mates[7][8]を使用する。ADVENTURE\_Matesはマルチエージェントシステムとして交通流を模擬するもので、各車両エージェントが自律的に認知・判断・行動を行い、創発現象を表現することができる。実際に、現実の大規模かつ複雑な交通流の分析や再現に利用された例もあり、信頼性の高いシミュレータである。

## (2) CAVの利他性の表現

Bıyık et al. [6]ではCAVの利他性を表現するパラメータ $\kappa$ を定義している。これは利用可能な最短経路でかかる所要時間の $\kappa$ 倍の遅延まで許容するという特性を表している。またこの研究ではゲーム理論のナッシュ均衡の考え方を用いて実現しうる均衡状態を整理しており、自由流時の所要時間の異なる複数の経路が存在するような出発地と目的地の組み合わせに対し、CAVをどの経路に割り当てればロバスト性の向上・社会的コストの低減につながるかについて考察している(図2)。

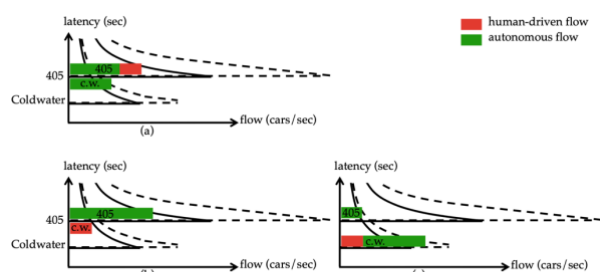


Fig. 5: (a) and (b) represent two selfish equilibria with the same social cost. The equilibrium with all autonomous flow on the 405 freeway (b) is more robust to additional unforeseen flow demand. Solid (resp. dashed) lines characterize the road with only human drivers (resp. autonomous vehicles). The 405 has maximum flow that benefits more from autonomy than the canyons – by routing all autonomous traffic onto the 405, a social planner can make the routing more robust to unforeseen demand. If some autonomous users are altruistic, a social planner can send them on the 405 while Coldwater is uncongested (c), leading to a lower overall travel time.

図-2 交通量と遅延の関係と CAV の分配について [6]

本研究では利他性を表すパラメータとして $\kappa$ を採用しつつ、遅延以外のコストに拡張し、複数の起終点 (origin-destination, OD) が存在する環境においても機能する手法を検討する。

## (3) K-shortest path problem

ADVENTURE\_Matesでは選好プロファイルに応じて最も好ましい最短経路を採用する。しかし今回は利他性の表現のため、許容できる範囲内の迂回路を選択するために最短経路以外の経路候補を取得する必要がある。つまり、ある文脈でK番目に短いパスを見つける K-shortest path problem を解くアルゴリズムを実装する必要がある。このアルゴリズムとしてYenのアルゴリズム[9]を採用した。これは探索済みのリンクを適切に削除しつつ経路探索を繰り返すもので、計算量は  $O(KN^3)$  程度である。

## 3. 利他的経路選択の実装と検証

### (1) シミュレーション環境

迂回路を選択する行動が実装できているかどうかを検証するため、図3の通りに一車線の直線とコの字型の迂回

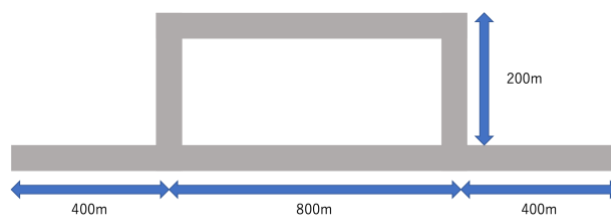


図-3 シミュレーション環境の模式図

路からなる簡単なネットワーク環境を設定した。交通需要のほとんどは左端から右端へと向かうものとした。

## (2) 検証

各車両エージェントに異なる $\kappa$ 値を与えてシミュレーションを実施した。CAVエージェントは二番目の経路まで探索し十分大きな $\kappa$ 値を設定した時には渋滞がなくても迂回路を選択することを確認し、正しく機能していることがわかった。一方でCAVエージェントがいない場合、十分に車両密度が高くない限り最短経路である直進以外を選ぶエージェントは存在しなかった。

## 4. おわりに

CAVと手動運転車両の混合環境において、CAVが社会全体の効率・パフォーマンスを向上させるためにどのようなマクロ挙動を実現できるかについて考察するために利他的な経路選択行動を実装することができた。

今後の課題としては、複雑なネットワークや複数のODが存在する環境でのシミュレーションの実施、複数存在する迂回路のうちどれを選ぶようにすべきかという分配問題などが考えられる。エージェントごとの判断に依拠する分散型が良いか、ある一定の規模のネットワークごとに中央集権的に需要を分配する方が良いかについても検討をしていきたい。

## 参考文献

- [1] Lioris J. et al.: Platoons of connected vehicles can double throughput in urban roads, *Transportation Research Part C*, Vol. 77, pp. 292-305, 2017.
- [2] Wu C. et al.: Emergent behaviors in mixed-autonomy traffic; *Conference on Robot Learning*, pp. 398-407, 2017.
- [3] Di X. et al.: A survey on autonomous vehicle control in the era of mixed-autonomy: from physics-based to AI-guided driving policy learning; *Transportation Research Part C*, Vol. 125, p. 103008, 2021.
- [4] Ye et al.: Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow; *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 490, pp. 269-277, 2018.
- [5] Wu W. et al: Modelling the traffic in a mixed network with

- autonomous-driving expressways and non-autonomous local streets, *Transportation Research Part E*. Vol. 134, p. 101855, 2020.
- [6] Bıyık, E. et al.: Altruistic Autonomy: Beating Congestion on Shared Roads. *Algorithmic Foundations of Robotics XIII*, pp. 887-904, 2018.
- [7] Yoshimura S.: MATES : Multi-Agent based Traffic and Environment Simulator - Theory, Implementation and Practical Application, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 11, No. 1, pp. 17–26, 2006.
- [8] Fujii H., et al.: Agent-based Simulation Framework for Mixed Traffic of Cars, Pedestrians and Trams, *Transportation Research Part C*, Vol. 85, pp. 234-248, 2017.
- [9] Yen, J.-Y.: Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science* Vol. 17, No. 11, pp. 712-716, 1971.