

話題提供

# 新しいモビリティシステムの シミュレーション

藤井 秀樹

東京大学大学院工学系研究科  
システム創成学専攻 准教授  
✉ [fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

2021/9/16 自動運転と共創する未来社会検討小委員会

## 研究のモチベーション (1)

### □ 交通流（自動車交通流）シミュレーション

#### 交通問題

- 交通渋滞
- 交通事故
- 膨大なエネルギー消費
- 環境への悪影響
  - 大気汚染・騒音, 温暖化
- 交通権（移動権）の不公平
- 災害時の交通 etc.

#### 交通問題への対策

- 新たな道路の建設（バイパス）・多重化
- 車線構成の変更
- 信号制御の最適化・適正化
- 非ガソリン車の導入（EV, FCV）
- ライフスタイルの変更
  - カーシェア, ライドシェア
  - 公共交通の利用促進 etc.

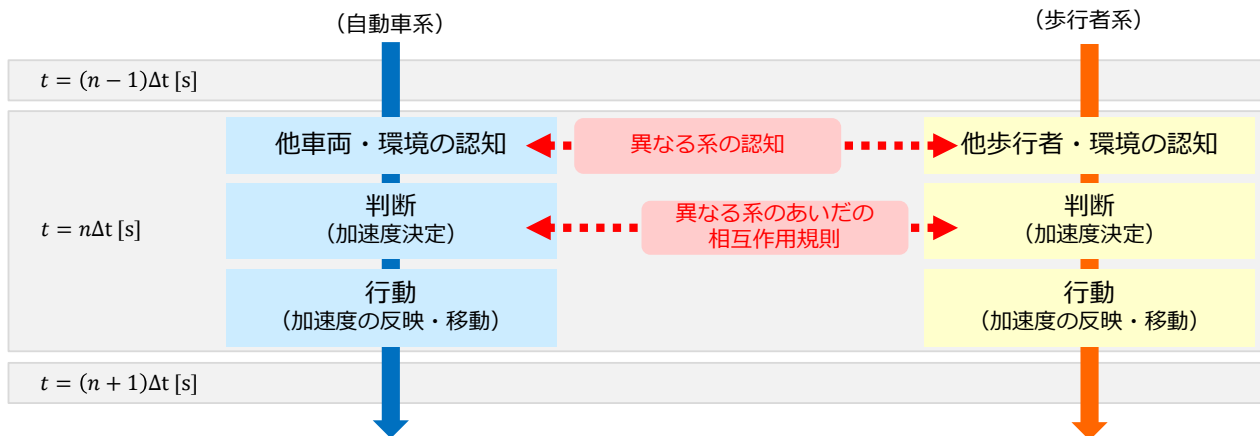
- インフラやシステムの変更を実施するまで効果が見えづらい
  - 社会システムは巨大・複雑であり, 効果がかならずしも十分でない場合や  
思わぬリスクが露見するおそれがある
- 実社会環境において実験を繰り返すのは現実的でない



- 交通流シミュレータを用いた **virtual social experiment** を実施することで  
対策の効果や想定外のリスクを定量的に評価し, 社会的意思決定を支援する

# 研究のモチベーション (2)

- 人流/群衆（歩行者交通流）シミュレーション
  - 道路交通の主役は自動車だけとは限らない
    - 道路空間の再配分, 交通安全, 災害時の避難
    - 大規模イベントの来場客の誘導
- 歩車混合交通シミュレーション
  - 公共交通促進策などの事前評価（アセスメント）



3

# 微視的交通流シミュレータの開発 (1)

- 多目的に利用可能な交通流シミュレータ
  - 渋滞解析だけでなく, 安全性評価, 環境影響評価, 新技術導入効果予測など

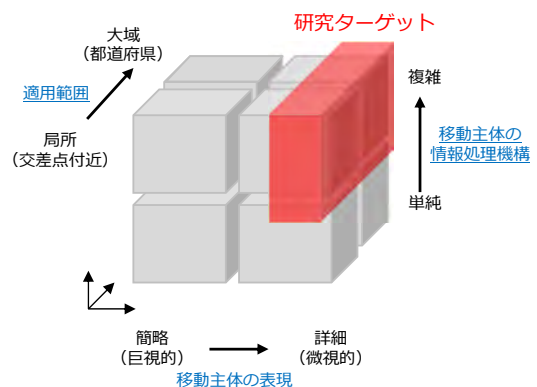


## 1. 精緻性と大規模性の両立

- 移動主体の表現：個々の主体を詳細に表現
- 適用範囲：広域都市圏までを対象

## 2. 階層的な複雑性の考慮

- 交通システム全体の挙動：
  - 集団挙動に起因する複雑性を反映
- 移動主体の情報処理機構：
  - 人間の情報処理の複雑性を反映



知的マルチエージェント交通流シミュレータ  
**ADVENTURE\_Mates**

ADVENTURE: **ADV**anced **ENG**ineering analysis **TOOL** for **UL**tra large **RE**al world  
 MATES: **M**ulti-**A**gent-based **T**raffic and **E**nvironment **S**imulator  
 [ソース公開URL] <https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/download/Mates.html>

4

# 微視的交通流シミュレータの開発 (2)

## マルチエージェントシステムの採用

- エージェント=移動主体 (自動車, 歩行者...)
  - 個別の属性と目的志向性を持つ
  - 環境を知覚し, 自律的に判断し, 行動する
  - 近くにいる他のエージェントとのみ相互作用する
  - 局所的な相互作用の総和から系全体の挙動が創発する
- 知的エージェント
  - エージェントの処理機構を高度化 (知的化)
    - 限定合理性, 学習, 協調行動 ...



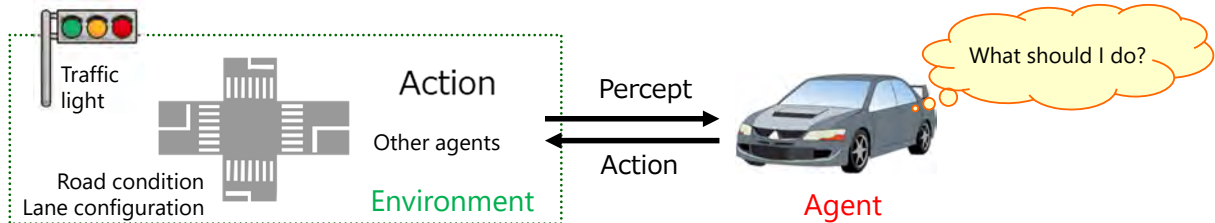
移動主体の  
微視的な表現



集団挙動に起因する  
複雑性



人間の情報処理の  
複雑性



# 微視的交通流シミュレータの開発 (3)

## シミュレーションで扱う交通行動

### リンクの交通需要のシミュレーション

- エージェントの出発地・目的地の決定
- 交通手段の決定
- 出発時間の決定
- 出発地と目的地を結ぶ最適な経路の選択

シミュレーションの  
入力として受け取る



### 走行過程のシミュレーション

- エージェントの認知・判断・操作過程
- 信号や他車との相互作用
- 渋滞や事故の創発

- A\*アルゴリズム** [Hart 1968] により  
コスト  $C_{route}$  を最小化する経路を探索

$$C_{route} = \sum_s \sum_{i=1}^6 w_i c_{s,i}$$

- $s$ : 経路に含まれる道路セグメント
- $c_1$ :  $s$  の長さ
- $c_2$ :  $s$  の予想旅行時間
- $c_3$ :  $s$  への進入が直進か否か (0 or 1)
- $c_4$ :  $s$  への進入が左折か否か (0 or 1)
- $c_5$ :  $s$  への進入が右折か否か (0 or 1)
- $c_6$ :  $s$  の車線数の逆数
- $w_i$ : 選好をあらわす重み

- Generalized Force Model** [Helbing 1998] により  
加速度決定要因を反映した加速度を算出

$$\frac{dv_n}{dt} = \underbrace{\frac{v_n^0 - v_n}{\tau_n}}_{\text{加速力}} + \underbrace{\min_{VL} \frac{V_{opt}(x_n, v_n, x_{VL}, v_{VL}) - v_n}{\tau_n}}_{\text{相互作用力 } (\leq 0)}$$

- $x_n, v_n, v_n^0$ : 車両  $n$  の位置, 速度, 希望速度,  $\tau_n$ : 加速時間,
- $V_{opt}(x_n, v_n, x_{VL}, v_{VL})$ : 仮想先行車 VL と車両  $n$  の車頭距離および  
相対速度から算出される最適速度

[Hart 1968] P.E. Hart, et al., A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimal Cost Paths, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, vol. 4, no. 2, pp. 100-107, 1968.

[Helbing 1998] D. Helbing and B. Tilch, Generalized Force Model of Traffic Dynamics, *Physical Review E*, vol. 58, no. 1, pp. 133-138, 1998.

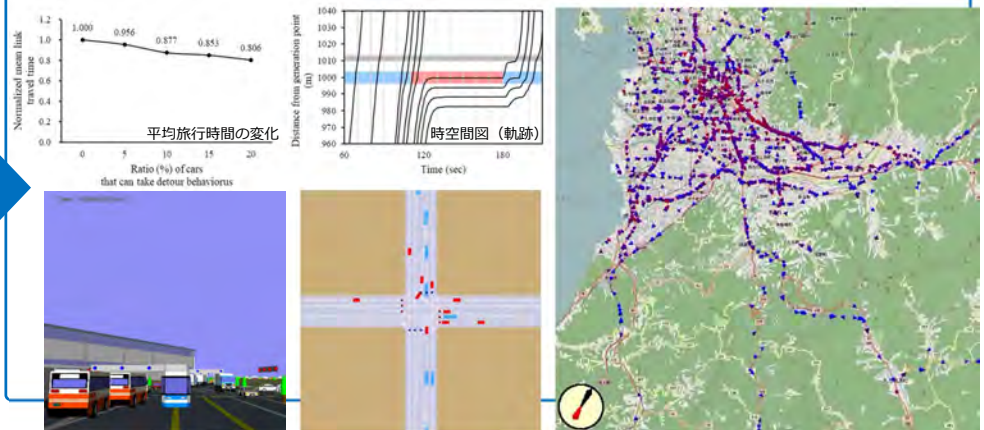
# 微視的交通流シミュレータの開発 (4)

## □ 入出力と機能の検証

### INPUT

- 道路ネットワーク
- 交差点座標・隣接関係
  - 車線構成
  - 制限速度
  - 車種別通行規制
- 信号制御パラメータ
- サイクル長
  - スプリット
  - オフセット
- 車両のパラメータ
- 交通需要
  - 経路探索の嗜好性

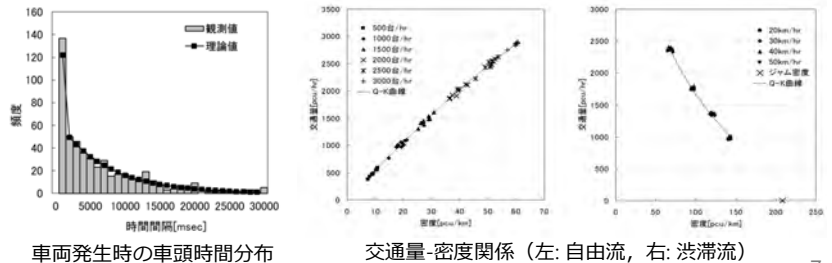
### OUTPUT



### 検証の例

- 標準検証プロセス [JSTE 2002]

[JSTE 2002] 交通工学研究会, 交通流シミュレーションの標準検証プロセス Verification マニュアル, 2002.



# これまでに実施した研究の例

## 現実の社会的課題の理解・解決への取り組み

### 渋滞の解消

- バイパスの建設
- 信号制御の最適化

### 交通と環境

- CO<sub>2</sub>排出量の推定

### 交通とテクノロジー

- 電気自動車の充電ステーション配置

### 道路空間のデザイン・再配分

- 路面電車, 歩行者との混合交通
- デマンドバス, ライドシェア

### エージェントの機能

- 協調行動
- 視覚認知モデル
- 経路選択の学習

### 計算技術

- 領域分割法を用いた並列計算
- 経路探索の高速化

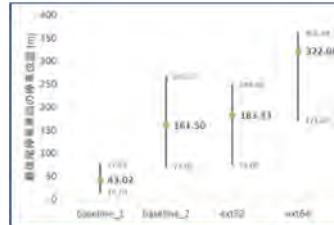
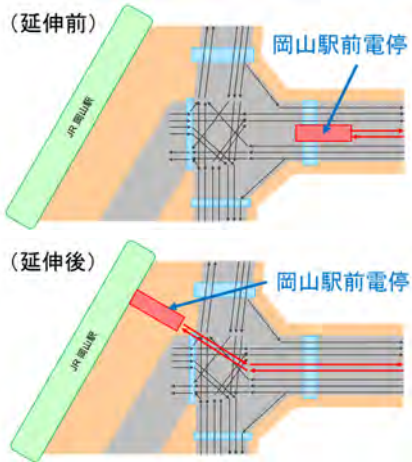
### 信頼性向上

- 逆問題としての交通需要の推定
- 不確実性評価

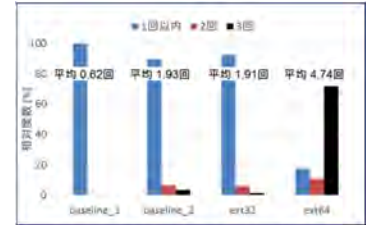
シミュレーションモデルの機能向上・信頼性向上

# 路面電車軌道延伸政策の事前評価 (1)

- 岡山駅前における自動車/歩行者/路面電車混合交通 [吉村 2017]
  - 街の周遊性を高めるねらいで岡山駅前電停の移設が検討されている
  - シミュレーションにより駅前交差点付近の自動車交通への影響を評価
    - 軌道延伸時に検討されている信号制御情報を入力



北からの流入第1車線の車列最後尾



北から直進する車両の信号停止回数

- 路面電車用現示が1サイクル(150秒)中32秒×1回の場合, 軌道延伸が交通に与える悪影響はゼロではないが軽微
- 路面電車用現示が1サイクル(150秒)中32秒×2回の場合, 駅前交差点北側道路における影響が顕著

[吉村 2017] 吉村, 藤井ら, 混合交通流シミュレータによる岡山駅前路面電車軌道延伸計画の交通影響評価, 交通工学論文集 (特集号), vol. 3, no. 4, pp. B\_1-B\_10, 2017.

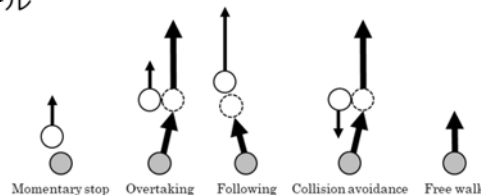
# 路面電車軌道延伸政策の事前評価 (2)

- 岡山駅前における自動車/歩行者/路面電車混合交通
  - 自動車/歩行者/路面電車モデルの連携 [Fujii 2020]

	存在環境	経路探索	速度決定要因	発生
自動車	車線 (1次元)	あり	信号, 先行車, 歩行者 交差点内の路面電車	確率的
路面電車	軌道 (1次元)	なし	信号, 交差点内の 自動車・歩行者, 電停の位置・時刻表	確定的
歩行者	横断歩道 (2次元)	なし	近傍の歩行者	確率的

## 歩行者エージェントの行動ルール

- 視野内の最近接歩行者を認識
- 最近接歩行者の進行方向・速度差に従って行動を決定

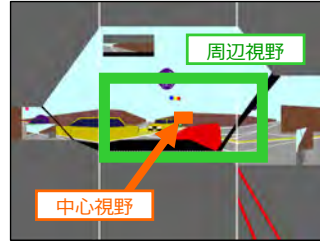
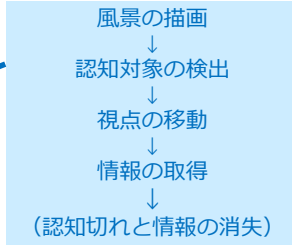
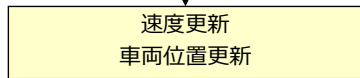
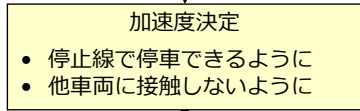
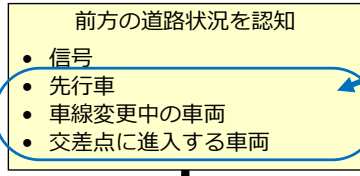


[Fujii 2020] H. Fujii et al., Mixed Traffic Simulation of Cars and Pedestrians for Transportation Policy Assessment, Crowd Dynamics, Volume 2: Theory, Models, and Applications, pp. 199-222, 2020.

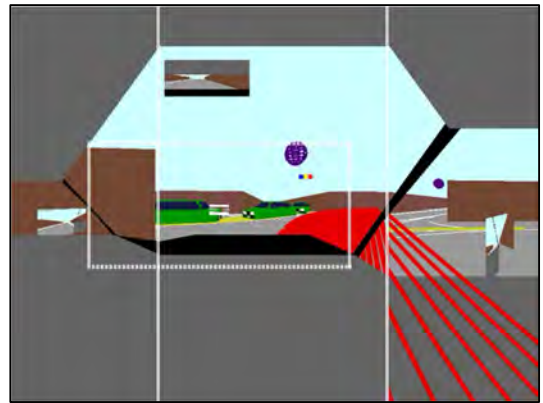
# 視覚認知モデルの実装と交通事故シミュレーション

## □ ドライバーの視野と視点移動を考慮したモデル [藤井 2011]

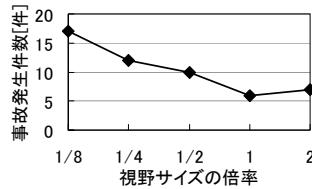
- 運転席から見える風景を画像化し、視界の中からのみ対象物を認知するモデル  
→ 限定合理性にもとづく交通事故の表現を可能とした



■ 認知済  
■ 未認知



認知に関するパラメータが変化すると  
事故発生件数が変化する

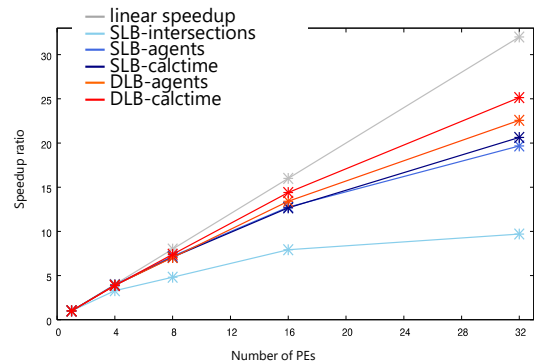
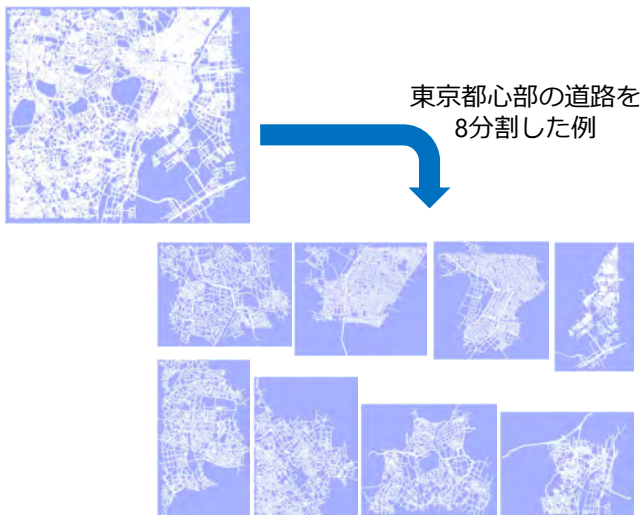


[藤井 2011] 藤井ら, マルチエージェント交通流シミュレーションにおける  
交通事故モデリング, 人工知能学会論文誌, vol. 26, no. 1, pp. 42-49, 2011.

# 大規模微視的交通流シミュレーションの実現

## □ 分散メモリ型並列交通流シミュレータの開発 [Fujii 2019]

- 増大する計算量の課題を克服
- 道路ネットワークをサブネットワークに分割する (領域分割)
  - それぞれのサブネットワークの計算を1つのプロセッサが担当する



計算時間からプロセッサの負荷を推定し、  
動的負荷分散を行うことで並列加速率が向上

[Fujii 2019] H. Fujii, et al., Parallelized Microscopic Traffic Simulation  
with Dynamic Load Balancing, ICCES 2019, #5442, 2019.

# 自動運転関連の研究トピック (1)

ここまでに紹介した微視的交通流シミュレータに実装されている自律エージェントは現実の人間より高い認知・判断能力を持っている意味では自動運転に近いかもしれないが現実の自動運転車と同じセンシングや制御のメカニズムが搭載されているわけではない

## □ 将来の道路交通で必要とされるシミュレーション

- 自動運転車やMaaS (Mobility as a Service) が**本当に普及した段階で何が起きるかはよく分かっていないのではないか**
- 劇的に変化するであろう社会・交通システムを制御する技術や効率的なサービス提供手法などは必ずしも成熟しているとは言いきれない

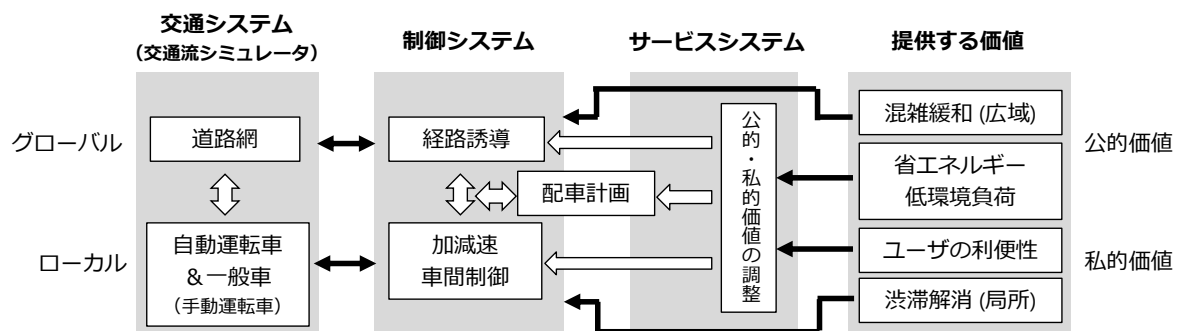


- 制御技術やサービス技術も社会に適応して進化していかなければならない
  - しかし、実際に社会システムが変化してからそれに追従して適応するのは遅い



**シミュレーションを駆使して  
事前に制御・サービスのアルゴリズムを検討**

# 自動運転関連の研究トピック (2)



## □ 想定する将来の交通システム

- Shared Autonomous Vehicle (SAV) : 自動運転車両を用いたライドシェア
  - 公共交通が不十分な地域でのラストワンマイルを補完する役割や、シェアリングによる自動車走行距離削減が期待される
  - 無人回送によるメリット/デメリットが生じうる

自動運転でないライドシェアと同様

**SAVを公共交通とみなしたうえで、  
公共の自動運転車を制御することで公的価値を向上させられないか**

# 運転方策の学習 (1)

□ これまでに分かっていること

● **エコドライブ：**

1台の車両の燃費を改善する走行法

⇨ 交通システムとしての効果は不明

● **渋滞吸収走行：**

高速道路において、渋滞エリアに到達するより前に  
意図的に車間距離を空けておくことで渋滞を吸収し  
速度低下を軽減する走行法

⇨ 個々の車両の速度低下だけでなく  
渋滞解消効果も実証されているが  
高速道路以外ではどうすればよいか

□ 研究の目的

● 自動運転車の運転方策を強化学習により獲得する

- とくに、信号による停止を含む一般道を対象とする
- 学習する1台だけの評価ではなく、後続する車群を含めて評価する
- CO<sub>2</sub>排出量を評価基準に加える

# 運転方策の学習 (2)

□ 強化学習の設定

● 環境と行動の離散化



- 環境s

- 交差点までの距離
- 自車両の速度
- 信号現示と切り替わりまでの時間
- 先行車との距離と速度

	分割範囲	分割幅	分割数	総分割数	状態総数
交差点までの距離	0~100m	10m	10	15	72900
	100m~500m	100m	5		
自車両の速度	0~60km/h	1km/h	60	60	
信号の状態	0~15秒 (赤残り時間)	5秒	4	9	
	0~15秒 (青残り時間)	5秒	4		
	存在しない		1		
先行車両との車間距離と速度差	0~45m (自車が速い)	15m	4	9	
	0~45m (自車が遅い)	15m	4		
	存在しない		1		

- 行動a

- 加速度+2.0 m/s<sup>2</sup> (加速)
- 加速度±0.0 m/s<sup>2</sup> (速度キープ)
- 加速度-2.0 m/s<sup>2</sup> (減速)

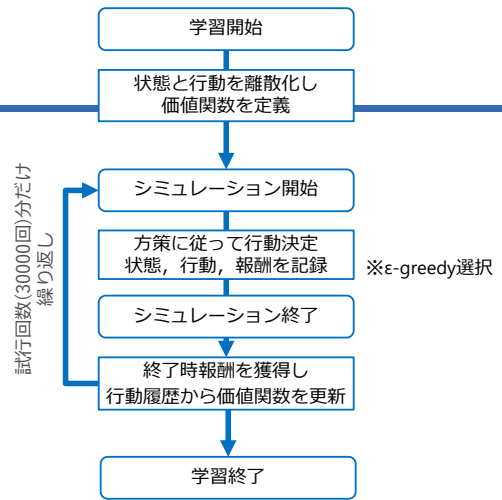


# 運転方策の学習 (3)

## 報酬 (罰) の定義

- 即時報酬
  - CO<sub>2</sub>瞬間排出量 (< 0)
- 終了時(※) 報酬
  - (CO<sub>2</sub>総排出量 + penalty) (< 0)
- シミュレーションの終了条件
  - 車両がゴールに到達 (penalty = 0)
  - 不必要な停止
  - 制限速度超過
  - 赤信号無視
  - 追突の発生

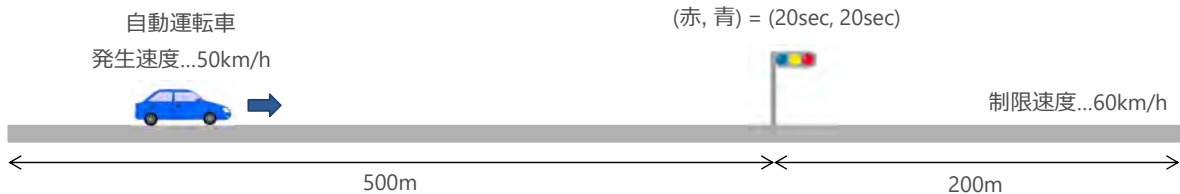
penalty >> 0



# シミュレーション (1)

## 実験シナリオとシミュレーション条件

- 実験1
  - 自動運転車が単独で走行



- 実験2
  - 前方に一般車が1台走行



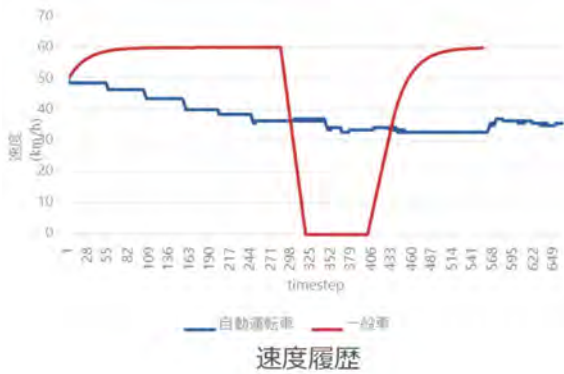
- 実験3
  - 後方に一般車が9台走行



# シミュレーション (2)

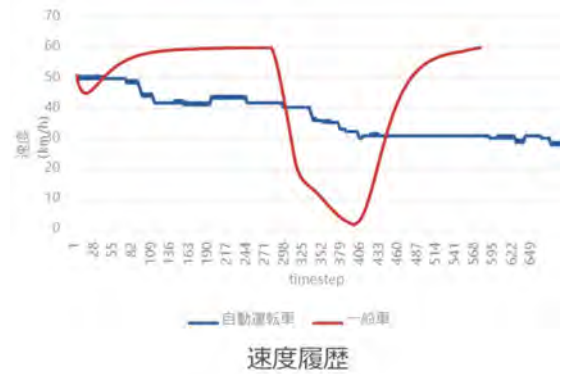
## 結果

### 実験1



	CO <sub>2</sub> 排出量[g]	旅行時間[sec]
一般車	185.2	55.3
自動運転車	138.0	65.9
増減	-25.5%	+19.2 %

### 実験2



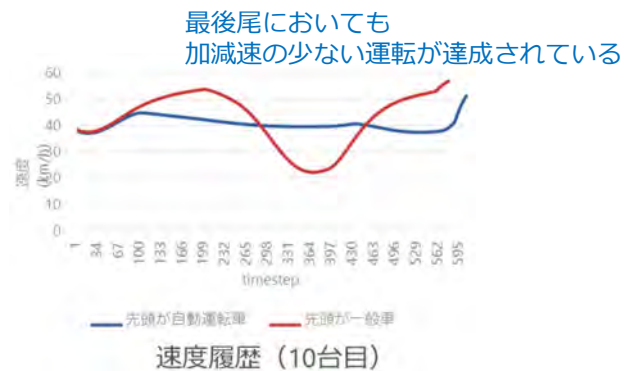
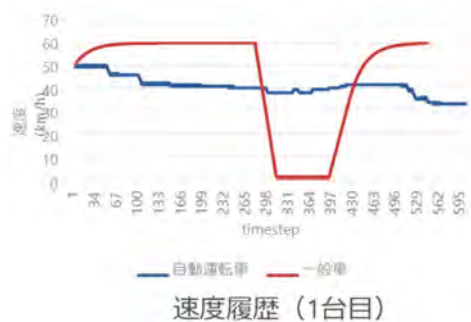
	CO <sub>2</sub> 排出量[g]	旅行時間[sec]
一般車	237.9	56.4
自動運転車	179.3	67.2
増減	-24.6%	+19.1%

- CO<sub>2</sub>排出量の少ない走行方法を獲得できている

# シミュレーション (3)

## 結果

### 実験3



CO<sub>2</sub>排出量 [g]

	1台目	2台目	3台目	4台目	5台目	6台目	7台目	8台目	9台目	10台目	計
先頭が一般車	156.0	167.9	176.8	174.8	173.8	172.4	169.2	166.0	163.5	161.6	1682.5
先頭が自動運転車	162.5	106.0	116.1	119.8	123.9	125.6	126.0	126.0	126.0	126.2	1258.0
増減	+4.2%	-36.9%	-34.3%	-31.4%	-28.7%	-27.3%	-25.8%	-24.1%	-22.9%	-21.9%	-25.2%

- 全体のCO<sub>2</sub>排出量を25%強削減できた

# まとめ

## □ 研究の目的（再掲）

- 自動運転車の運転方策を強化学習により獲得する
  - とくに、信号による停止を含む一般道を対象とする
  - 学習する1台だけの評価ではなく、後続する車群を含めて評価する
  - CO<sub>2</sub>排出量を評価基準に加える

## □ 結論

- 既存の微視的交通流シミュレータにCO<sub>2</sub>排出量と旅行時間を最適化するための学習機能を実装した
  - 信号、他車両、道路環境に応じて正しく学習が進むことを確認
- 信号を含む道路において車群のパフォーマンスを測定
  - 先頭の自動運転車の運転方策が後続の自動車に与える影響は大きく、1台の自動運転車を導入することで後続9台の自動車のCO<sub>2</sub>排出量を平均して約25%減少させられることを示した

これは第1弾の成果であり、大規模化や手法の見直しについて今後検討する予定