

# 従来車と調和する自動運転車の運転挙動モデル

西村 友佑<sup>1,a)</sup> 藤田 敦<sup>1,b)</sup> 廣森 聡仁<sup>1,c)</sup> 山口 弘純<sup>1,d)</sup> 東野 輝夫<sup>1,e)</sup> 諏訪 晃<sup>2,f)</sup>  
浦山 博史<sup>2,g)</sup> 竹嶋 進<sup>2,h)</sup> 高井 峰生<sup>3,i)</sup>

**概要:** 自動運転車の普及過渡期においては、自動運転車と人間が運転を行う車(従来車)が同じ道路上に混在する環境が生じる。そのような環境では、自動運転車の運転挙動が従来車の運転挙動に影響を与える。例えば、自動運転車が安全性を重視し速度を抑えて走行すると、従来車による追い越し行動を誘発する可能性がある。本研究では、ドライバの個性や自動運転車の運転特性を反映可能な運転挙動モデルを、マルチエージェントシミュレータに組み込むことで、自動運転車と従来車が混在する環境を再現し、交通マイクロシミュレーションにより、自動運転車の運転挙動によって交通の流れと乗員のストレスがどのように変化するかを明らかにする。既存の運転挙動モデルをベースに、判断から操作までの遅延時間を組み込み、モデルのパラメータを介して、従来車や自動車運転車の運転の特性を反映する。交通の流れに対する評価は、速達性と効率性の二つの観点に基づき実施し、乗員のストレスに対する評価は、自車の挙動や他車との位置関係に基づき実施する。多車線の直線道路における評価実験を実施し、自動運転車と従来車の比率、自動運転車の運転挙動によって、それらの評価指標がどのように変化するかを明らかにし、効率の良い交通流を生み出しつつ乗員のストレスを最小限に抑える自動運転車の運転挙動の検討を行った。

## A Study on Behavior of Autonomous Vehicles Cooperating with Manually-Driven Vehicles

YUSUKE NISHIMURA<sup>1,a)</sup> ATSUSHI FUJITA<sup>1,b)</sup> AKIHITO HIROMORI<sup>1,c)</sup> HIROZUMI YAMAGUCHI<sup>1,d)</sup>  
TERUO HIGASHINO<sup>1,e)</sup> AKIRA SUWA<sup>2,f)</sup> HIROFUMI URAYAMA<sup>2,g)</sup> SUSUMU TAKESHIMA<sup>2,h)</sup>  
MINEO TAKAI<sup>3,i)</sup>

### 1. 序論

自動運転の実現は、交通事故防止や運転時間の削減によるドライバの自由時間の確保など、交通社会やドライバに

多大な利益をもたらすことが予想され、その実現に対する機運が高まっている。官民 ITS 構想・ロードマップ [1] によると、自動運転車の市場化期待時期は 2020 ~ 2025 年を目処とされており、近い将来、自動運転車の普及が進むことは確実である。しかし、平成 29 年 10 月末現在、国内の自動車保有台数は約 8,187 万台にものぼる [2] ため、全ての車が一斉に自動運転車に入れ替わることはなく、その普及には相当な期間を要することが予想される。この普及過渡期においては、自動運転車 (SAE International Standard J3016 の規定でレベル 3 以上) と人間のドライバが運転主体となる従来車 (レベル 0~2) が同じ道路上に混在する環境が生じる。そのような環境では、自動運転車の運転挙動が従来車のドライバの運転行動や心理に影響を与える可能性が示唆されている。事実、ロンドン・スクール・オブ・エコノミクスとタイヤメーカーのグッドイヤーが、11 カ国の約 12,000 名のドライバを対象に行った自動運転車に対する

<sup>1</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology,  
Osaka University  
<sup>2</sup> 住友電気工業 (株)  
Sumitomo Electric Industries, LTD.  
<sup>3</sup> カリフォルニア大学 ロサンゼルス校  
University of California, Los Angeles  
a) y-nishimura@ist.osaka-u.ac.jp  
b) a-fujita@ist.osaka-u.ac.jp  
c) hiromori@ist.osaka-u.ac.jp  
d) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp  
e) higashino@ist.osaka-u.ac.jp  
f) suwa-akira@sei.co.jp  
g) urayama-hirofumi@sei.co.jp  
h) takesima@sei.co.jp  
i) mineo@ieee.org

意識調査のアンケート [3] では、約 41% の回答者が、自動運転車が自車の隣を走行することに不快感を覚えると答えている。自動運転車が効率と安全性のどちらか一方を重視すると、混在環境では従来車のドライバーの混乱をもたらす可能性があり、自動運転車は従来車のドライバーに与える影響を把握した上で適切に運転行動を決定する必要がある。

本研究では、自動運転車と従来車が混在する環境を再現したマイクロ交通シミュレーションにより、自動運転車の運転挙動によって交通流の良し悪しと乗員のストレスがどのように変化するかを明らかにする。自動運転車や従来車の運転特性を反映可能な運転挙動モデルを、マイクロ交通シミュレーションが可能なマルチエージェントシミュレータ Scenargie[4] に組み込むことで、シミュレーション環境を構築している。運転挙動モデルは、著名な追従走行モデルである Intelligent Driver Model (IDM) [5] をベースにした加減速モデルと、妥当性が検証されており IDM と組み合わせることが可能な車線変更モデルを実装する。これらのモデルは、希望速度や希望車頭時間といったドライバごとに異なる様々な特性をパラメータを介して表現することが可能である。また、判断から操作までの遅延時間を運転挙動モデルに組み込むことで、自動運転車と従来車の違いを表現する。交通の流れは、効率性と速達性という観点から評価を行い、乗員のストレスは、職業運転者が運転中に経験するストレスの具体的な内容 [6] を基に評価を行なった。このもとで、多車線の直線道路を対象としたシミュレーションを行い、自動運転車の運転挙動と混在率によって、それらの評価指標がどのように変化するかを分析し、自動運転車の適切な運転挙動の検討を行った。その結果、制限速度 60[km/h] の道路において、混在率が 20[%] 以下の場合には、自動運転車の希望速度は 70 ~ 80[km/h] に、自動運転車の希望車頭時間は 1.0 ~ 2.0[s] に設定し、混在率が 30[%]、もしくは 90[%] 以上の場合には 90[km/h]、1.0 ~ 1.5[s] に、それ以外の場合には 70[km/h]、1.0 ~ 1.5[s] に設定すると、交通の効率性と速達性を向上させつつ、乗員のストレスを最小限に抑えた走行が可能になることを明らかにした。

## 2. 関連研究

### 2.1 運転挙動モデル

Microscopic モデルによるシミュレーションでは、個々のドライバーの運転挙動を数理モデルで表現する方法が一般的である。前方車に衝突しないための様々な規則や閾値を基準に加減速制御を行う一連の流れをモデル化した前車追従モデルをベースとし、複数車線道路における車線変更や追い越しモデル、交差点や車線合流モデルといった複雑な運転挙動のモデルを組み込み、現実の交通状況を再現する。

IDM[5] は、前方車に衝突せず、適切な車間距離を保持し走行するための加減速制御をモデル化したものであり、VISSIM[7] や SUMO[8] をはじめとして多くの交通シミュ

レータに実装されている。IDM は、希望速度、希望車頭時間、最大加速度などの少数のモデルパラメータにより、加減速制御を実現していることが特徴であり、実環境における現実性とシミュレーションの簡易性を両立している。また、IDM を拡張し様々な道路交通環境における追従挙動をより細かく表現するモデルの開発に関する研究もいくつか実施されている。文献 [9] では、道路の見通しの良さや周辺車両の将来の挙動を考慮した衝突リスクを定式化し、IDM に組み込むことで曲線上や見通しの悪い状況での追従挙動をモデル化している。文献 [10] では、前方車との車間距離が極端に小さい状況において、IDM では減速度が非常に大きな値となり、非現実的な挙動が生成されるという欠点を改善している。また、レーダやカメラを用いて前方車の速度や距離を計測し、自動的に速度や車間距離の調整を行う Adaptive Cruise Control への応用も試みられている [11][12][13]。

実環境での車線変更の運転挙動を再現するためには、左右方向移動の行動判断基準を実装することが必要になる。文献 [14] は、車線変更を強制的に行われるものと自発的に行われるものに区別し、それぞれに対して、車線変更の誘発条件（動機）や車線変更の安全条件を組み入れ、車線変更時の自車状態の変化や他車両との相互作用に基づく左右方向の運転挙動をモデル化している。SUMO では車線変更の動機を、(i) 目的地へ向かうため、(ii) 前方車を追い越すため、(iii) 速度の大きい後続車に進路を譲るため、(iv) 追い越し後に元の車線に戻るため、の 4 タイプに分類し、それぞれについて車線変更の発生条件を定めている [15]。例えば目的地到達のための車線変更では、現在走行中の車線が目的地に接続していないことが車線変更の発生条件であり、目的地までの距離や到達時間、変更完了までの推定所要時間などを基に条件が定められている。文献 [16] では、車線変更を区別せず、自車と周辺車両の状態に基づいて車線変更の有用性と安全性を定式化し、車線変更を実施するか否かの判断を行うモデルを提案している。文献 [17] では、車線変更の動機の大きさを定式化し、加えて IDM と組み合わせることにより車線変更前の周辺車両との協調行動を実現している。また、オランダの Rotterdam にある A20freeway に設置されている車両検出器から、車線毎の交通量と空間平均速度の実測データを抽出し、シミュレーション結果と比較することで妥当性の検証を行っている。文献 [18][19] は、合流部付近での車線変更行動のモデル化している。車線減少における合流タイミングや合流先の車両との安全車間距離の確保といった複数の要因や条件が定められており、合流部での不自然な衝突事故の発生や交通容量の低下を抑制している。

### 2.2 自動運転車同士の協調走行

普及が十分に進んだ段階では、自動運転車同士で協調的

な運転挙動を取ることによって様々な社会効果が期待できる。例えば、周辺車両と高密度な車群を形成し車間距離を可能な限り短くする隊列走行や群走行では、走行時の空気抵抗削減による CO<sub>2</sub> 排出量削減や、交通容量増加による渋滞解消が期待できる。文献 [20] では、隊列走行する自動運転車群の車両状態を車車間通信を介して取得し、自車状態を基に協調挙動を取る運転モデルを提案し、複数車線道路上でのシミュレーション実験を実施している。実験では自動運転車の存在割合を変えたときの走行速度や燃料消費量の変化を評価しており、自動運転車の存在割合が低い（例えば 10%程度）場合は、従来車両が周辺交通に与える影響が、渋滞の主要発生要因となることを明らかにしている。文献 [21] では、従来車を先導車とし自動運転車を追従車とした隊列の間に、新たな自動運転車が合流する際の車線変更のアルゴリズムを提案している。車線変更の際に必要な最低限の車間距離が保たれるか、不自然な速度の変化によって乗員が不快に感じることはないかを検証するために実際の車両に車線変更アルゴリズムを実装し、テストコースでの実験を実施している。その結果、実際の車間距離と最低車間距離の差は 2m 以内に抑えられ、乗員の不快感も最小限に留められたことを明らかにしている。文献 [22] では、車車間通信によって得られる前方車の情報を用いることで Adaptive Cruise Control より精密な追従走行が可能な Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) を搭載した車両が混在する状況を想定し、交差点付近での CACC 搭載車専用レーンの設置の有用性を VISSIM によるシミュレーションで評価している。CACC 搭載車両の混在率と専用レーンの有無による、交差点での平均停止時間、平均速度および車両の通過台数の変化を明らかにしている。

## 2.3 本研究の位置づけ

先に挙げた研究ではいずれも車車/路車間通信によって、周辺の自動運転車同士で位置や速度といった情報を共有することを前提としており、自動車同士で協調することで理想的な交通流を生み出すことを目的としている。しかし、初期に導入される自動運転車は、そのような情報共有や自動車同士の協調を行わず、自律的に運転を行うと考えられる。そのような自律型の自動運転車と従来車が混在する時期の交通では、車群を先導する車両が明確でない混沌とした環境が想定され、自動運転車の意思決定が交通容量や安全性など交通全体に大きな影響を与えると考えられる。本研究では、自律型の自動運転車の意思決定を、どのようなパラメータで表現するかの指針を与えており、隊列走行の影響を評価した従来研究 [20] やその類似研究などとは大きく異なる。また、乗員のストレスという観点から混在期における交通を評価した点においても従来研究には見られない新規性を有するといえる。

## 3. ドライバの運転挙動モデル

運転挙動は、加減速によって生じる前後方向の動きと、車線変更によって生じる左右方向の動きの組合せにより表現される。本研究では、従来車のみで環境で妥当性が検証されているモデルをマルチエージェントシミュレータ Scenargie 上に実装し、そのモデルのパラメータ値によって、走行速度や車間距離、車線変更のタイミングといったドライバ毎に異なる運転挙動を生み出し、自動運転車と従来車間の関係性を再現する。

### 3.1 車線変更モデル

車線変更モデルでは、周辺車両の速度や車間距離に基づき、個々の車両が車線変更を実施するか否かを判断する。本研究では、車線変更の必要性の判定と、安全な車線変更条件の判定を行い、それらの条件が満たされた際に車線変更を実施する。

#### 3.1.1 車線変更の必要性の判定

車線変更に対する欲求の強さを定量化した既存の車線変更モデル [17] に基づき、車線変更の必要があるか否かの判定を行う。文献 [17] で提案されているモデルでは、車線変更行動の代表的な動機として、(i) 目的地に沿った車線を走行するため（この動機の大きさを  $d_r^{ij}$  で表す）、(ii) 自車の速度を向上させるため（この動機の大きさを  $d_s^{ij}$  で表す）、(iii) キープレフト（この動機の大きさを  $d_b^{ij}$  で表す）を遵守するため、を挙げており、それぞれの動機を周辺車両の速度や車間距離、目的地までの距離に基づき定式化し、それらを組み合わせ、車線変更に対する欲求を定量化している。具体的には、車線  $i$  から車線  $j$  へ車線変更を実施したいという欲求 ( $d^{ij}$ ) を式 (1) で表す。

$$d^{ij} = d_r^{ij} + \theta_v^{ij} (d_s^{ij} + d_b^{ij}) \quad (1)$$

$\theta_v^{ij}$  は、自発的な動機の比重を決定するパラメータである。 $d^{ij}$  が閾値 ( $d_{free}$ ) 以上となる時、車線  $i$  から  $j$  への車線変更の必要性があると判断する。

#### 3.1.2 安全条件

自車が安全に車線変更を実施できるか否かを判断する安全条件について述べる。安全条件は、(i) 車線変更先の後続車  $b'$  との車間距離  $d_{b'}$  が最低車間距離 ( $GD_{MIN}$ ) 以上、(ii) 車線変更前の前方車  $f'$  との車間距離  $d_{f'}$  が  $GD_{MIN}$  以上、(iii) 車線変更を実施した後の、車線変更先の後続車の減速度  $\tilde{b}_{b'}$  が、自車が許容できる最大減速度  $b_{safe}$  を超えない、(iv) 車線変更を実施した後の、自車の減速度  $\tilde{b}_b$  が、自車が許容できる最大減速度  $b_{safe}$  を超えない、の 4 つの条件で構成され、これらの全ての条件を満たすとき、車線変更を安全に実施できると判定する。安全条件は、式 (2) で表される。

$$d_{b'} \geq GD_{MIN} \wedge d_{f'} \geq GD_{MIN} \wedge \tilde{b}_{b'} \leq b_{safe} \wedge \tilde{b}_b \leq b_{safe} \quad (2)$$

また、 $GD_{MIN}$  は停車時の最低車間距離 ( $gd_0$ )、自車と前方車との希望車頭時間 ( $T$ )、現在の時刻における自車の速度 ( $v(t)$ )、現在の時刻における前方車の速度 ( $v_f(t)$ ) に基づき式 (3) で決定する。

$$GD_{MIN} = gd_0 + T * v(t) + \frac{v(t)(v_f(t) - v(t))}{2\sqrt{a_{safe}b_{safe}}} \quad (3)$$

### 3.2 加減速モデル

加減速モデルは、現在の時刻における自車の速度や周辺車両の速度、車間距離などに基づき、次の時刻における加速度を決定することで、車両の挙動を定める。加減速に関する挙動は、前方に他の車両が存在せず加速が自由に行える状況で走行する場合 (自由走行時) と、前方に他の車両が存在し、前方の車両に追従して走行する場合 (前車追従時) の二種類に分類され、それぞれの状況について、異なる加減速モデルを構築する。

#### 3.2.1 自由走行時の挙動

自由走行時の加速度は式 (4) に基づき定められる。自車が許容できる加速度の最大値を  $a_{safe}$ 、自車の希望走行速度を  $v_d$ 、シミュレーションの時間間隔を  $\delta t$  で示す。

$$\frac{dv(t+1)}{dt} = \begin{cases} 0 & (v(t) = v_d) \\ v_d - v(t) & (v_d - a_{safe} * \delta t \leq v(t) \leq v_d) \\ a_{safe} & (v(t) \leq v_d - a_{safe} * \delta t) \end{cases} \quad (4)$$

自車の走行速度が希望速度に達している場合は、加速を行わずその速度を維持し、自車の走行速度が希望速度に達していない場合は、加速度  $a_{safe}$  で加速する。ただし、加速度を  $a_{safe}$  に設定すると次の時刻における速度が希望速度を超過する場合は、次の時刻における速度が希望速度を超えないよう、加速度を調整する。

#### 3.2.2 前車追従時の挙動

自車の前方に走行車両が存在する場合、ドライバーは前方車に追従するように自車の速度を調整する。前方車への衝突を避ける減速および滑らかな加速を表現できる IDM に基づき、前車追従時の加速度を定める。前方車との車間距離を  $gd$  と表した際の前車追従時の加速度を式 (5) に示す。

$$\frac{dv(t)}{dt} = a \left[ 1 - \left( \frac{v(t)}{v_d} \right)^4 - \left( \frac{GD_{MIN}}{gd} \right)^2 \right] \quad (5)$$

#### 3.2.3 車線変更に対する速度調整

車線変更先に前方車が存在し、車線変更に必要な車間距離がとれない場合や隣接車線前方を走行する車両が自車線への車線変更を希望する場合、車線変更の欲求の大きさに応じて車間距離を確保するための速度調整を行う。具体的には自車の車線変更の欲求の大きさが閾値 ( $d_{sync}$ ) 以上で必要性の条件を満たし、安全性の条件を満たさない場合、

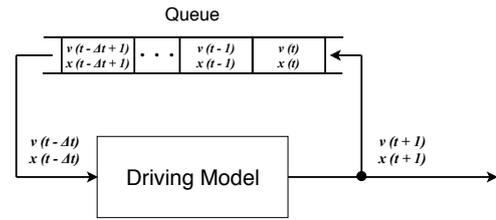


図 1 遅延時間を考慮した交通シミュレータのフィードバック

車線変更先の前方車を仮想的な前方車とみなし、式 (5) に従い加減速度を決定する。また、隣接車線前方を走行するドライバーの車線変更の欲求の大きさが閾値 ( $d_{coop}$ ) 以上であり、安全性の条件を満たさない場合、隣接車線前方を走行する車を仮想的な前方車とみなし、式 (5) に従い加減速度を決定する。

### 3.3 運転挙動の反映の遅れ

自動車の運転は、一般的に認知・判断・操作のサイクルで成り立っている。周辺車両の状況を認識してから、ペダルの踏み替えや踏み込み、ハンドルの操舵の必要性を判断し、その操作が自動車の挙動に反映されるまでに一定の時間が経過するため、一定時刻前の情報を基に決定した操作が自動車の挙動に反映される。自動運転車はこのサイクルを全て機械で行うため、人間と比較すると特に判断から操作までの遅延時間が非常に小さい。本研究では、判断から操作までの遅延時間 ( $t_d$ ) による運転挙動の反映の遅れを運転挙動モデルに組み込むことで、自動運転車と人間が運転する車の違いを再現する。一般的な交通シミュレーションでは、現時刻  $t$  での車両の速度や位置を基に次時刻  $t + \delta t$  の車両の速度や位置を決定する。一方、本研究で行う交通シミュレーションでは、図 1 に示すように、時刻  $t - t_d$  での車両の速度や位置を基に次時刻  $t + \delta t$  の車両の速度や位置を決定することで、判断から操作までの遅延時間に伴う運転挙動の反映の遅れを再現する。

### 3.4 運転挙動の特性の表現

本研究では、運転挙動モデルに含まれる各種パラメータの値により従来車と自動運転車の運転挙動の特性を反映する。道路を走行する車両の流れは、個々の車両の挙動に着目し微視的な視点で捉える場合、速度や車頭時間、車間距離などの状態量の確率分布を用いて表現することができる [23]。実際、本研究で用いたモデルでは、車線変更の実施の判断や加減速度は、自車や周辺車両の速度や自車と周辺車両との車間距離に基づいて決定される。そのため、表 1 に示す運転挙動モデルのパラメータのうち、車両の速度と車間距離の決定に多大な影響をもたらす、希望速度と車頭時間のパラメータ値によって運転挙動の特性の反映を行う。従来車については、個々の車両毎に適切な確率分布に従って割り当てることで、運転挙動のばらつきを生み出

表 1 運転挙動モデルのパラメータ値

パラメータ	従来車の値	自動運転車の値
希望速度 ( $v_d$ [km/h])	実測値から推定された分布	シナリオに依る
希望車頭時間 ( $T$ [s])	$N(\mu = 1.69, \sigma = 0.35)$	シナリオに依る
反応時間 ( $t_d$ [s])	0.7	0.1
最大加速度 ( $a_{safe}$ [m/s <sup>2</sup> ])		1.25
最大減速度 ( $b_{safe}$ [m/s <sup>2</sup> ])		2.09
停止時の車間距離 ( $gd_0$ [m])		3
車線変更の実施判定の閾値 ( $d_{free}$ )		0.365
自車の車線変更に対する速度調整の実施判定の閾値 ( $d_{sync}$ )		0.577
他車の車線変更に対する速度調整の実施判定の閾値 ( $d_{coop}$ )		0.788

す。従来車の希望速度は制限速度 60[km/h] の道路での実勢速度の分布 [24] を参考に正規分布 (平均 79.8[km/h], 標準偏差 8.28[km/h]) に従って決定する。従来車の車頭時間は、大阪府道 2 号大阪中央環状線の陸橋上から計測したデータからカーネル密度推定法によって推定された確率分布 (平均 1.69[s], 標準偏差 0.35[s]) に従って決定する。自動運転車の運転挙動の特性も、希望速度と車頭時間のパラメータ値を介して反映する。その他のパラメータについては文献 [17] に記載されている値を用いる。

#### 4. 交通マイクロシミュレーションによる交通流と乗員のストレスの分析

3 章で述べた運転挙動モデルをマルチエージェントシミュレータ Scenargie 上に実装することにより、自動運転車と従来車の混在環境を再現する交通マイクロシミュレーションを実施する。このシミュレーションにおいて、自動運転車の運転挙動の違いや自動運転車の混在率によって、交通流と乗員のストレスがどのように変化するかを分析する。

##### 4.1 評価指標

本研究では、交通流の良し悪しを効率性、速達性という観点から評価する。交通の効率性を測る指標としては、交通容量を用いる。交通容量は、単位時間内にある道路の断面を通過することができる自動車の最大台数を指し [25]、交通容量が大きいほど、より多くの自動車能够通过できることを示す。交通の速達性を測る指標としては、全車両の旅行時間の平均値を用いる。旅行時間は、自動車がある特定の区間を走行するために要した時間 [26] で、旅行時間が小さいほど、当該区間を素早く通過できることを示す。

乗員のストレスは、自車の挙動や他車との位置関係を基に評価する。職業運転者が運転中に経験するストレスの具体的な内容 [6] のうち、シミュレーションで表現される場面として (i) 速度低下によって時間に間に合わないかもしれないという焦り、(ii) 他車の割り込みに対しての立腹や割り込みによる事故に対する不安、(iii) 目的とするルートを走行できないかもしれないという不安が挙げられる。それぞれを原因とするストレスがどの程度発生するかを確かめ

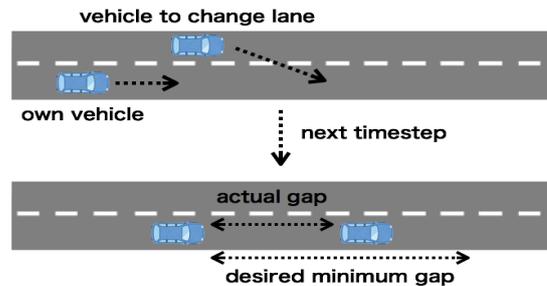


図 2 割り込み発生時の他車との位置関係

表 2 シミュレーション条件

シミュレーション時間 [s]	3600
車両挙動の更新間隔 [s]	0.1
制限速度 [km/h]	60
車両発生車線	ランダム
目的車線	発生車線と同じ
車両発生間隔	交通量の逆数

るために希望速度と走行速度の差、割り込まれる回数、目的地を逃す確率を評価指標として定める。なお、割り込みの定義は、他の走行車両が自車線前方へ車線変更した際、自車と車線変更を実施した車両との車間距離が式 (3) で定まる最低車間距離未満となるような車線変更とする。車線変更による割り込みが発生した際の他車との位置関係を図 2 に示す。

##### 4.2 想定する道路環境とシミュレーション条件

車両の挙動が比較的単純な、合流部や交差点の存在しない多車線の直線道路を対象とし、全長 3[km]、1 車線あたりの幅員 6[m]、片側 3 車線の道路環境において、シミュレーションを実施した。交通容量を調査する際は、最大交通量を把握するために 1000[veh/h] から 100[veh/h] 刻みで 2000[veh/h] までの値を入力として与える交通量として指定した。また、その他の指標を評価する際は、走行車両の数が比較的多い自由流の状態を再現するために、1000[veh/h] を入力として与える交通量として指定した。その他のシミュレーション条件を表 2 に示す。

##### 4.3 シミュレーションシナリオ

3.4 節で述べたように希望速度 ( $v_d$ ) と希望車頭時間 ( $T$ ) の 2 つのパラメータを介して自動運転車の運転挙動の特性を決定する。それぞれのパラメータが交通流や乗員のストレスにどのような影響を与えるかを知るために、一方のパラメータを従来車の平均値に固定し、もう一方のパラメータを順次に変化させシミュレーションを行った。自動運転車の希望速度を変化させるシナリオをシナリオ I とし、希望車頭時間を変化させるシナリオをシナリオ II とする。シナリオ I における自動運転車の希望速度と希望車頭時間のパラメータ値を表 3 に示し、シナリオ II におけるパラメータ値を表 4 に示す。

表 3 シナリオ I における自動運転車のパラメータ値

パラメータの記号	自動運転車のパラメータ値
$v_d$ [km/h]	50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120
$T$ [s]	1.69 (従来車の平均値)

表 4 シナリオ II における自動運転車のパラメータ値

パラメータの記号	自動運転車のパラメータ値
$v_d$ [km/h]	79.8 (従来車の平均値)
$T$ [s]	0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0

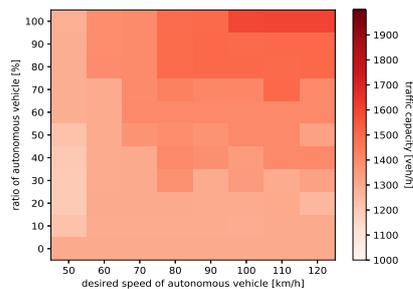


図 3 交通容量の変化

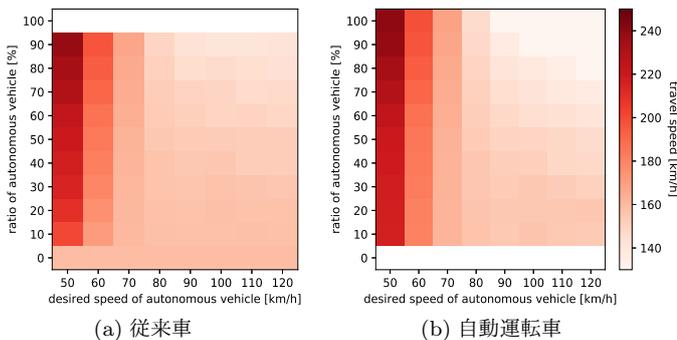


図 4 旅行時間の変化

#### 4.4 シミュレーション結果

##### 4.4.1 シナリオ I

シナリオ I における交通流の変化を図 3, 4 に示す。交通容量については、自動運転車の希望速度が制限速度 (60[km/h]) 以上でその混在率が 20[%] 以下の場合、従来車のみの環境と比較すると自動運転車の希望速度に関わらず変化しない。しかし、自動運転車の希望速度が従来車の平均値より大きい 80[km/h] 以上でその混在率が 30[%] 以上の状況では、自動運転車の希望速度と混在率の増加に伴い交通容量も増加する。従来車の旅行時間については、自動運転車の希望速度を 80[km/h] 以上に設定すると、混在率の増加に伴い減少する。自動運転車の旅行時間に関しては希望速度を大きくするほど減少する。混在率が 20[%] 以下の場合、自動運転車の希望速度を大きく設定しても、前方を走行する従来車に追いつき、自動運転車が従来車に追従して走行する時間の割合が多くなるため、交通流は変化しなかったと考えられる。しかし、混在率が 30[%] 以上になると、速度の大きい自動運転車が車群の先導車となるケースが増えるため、希望速度の上昇に伴い交通の効率性

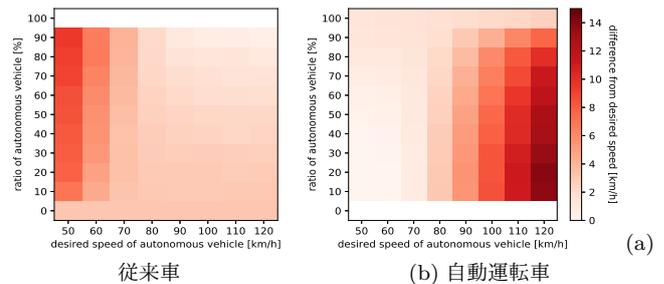


図 5 希望速度と走行速度の差の変化

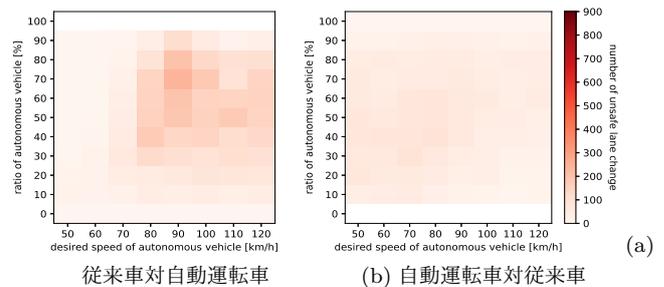


図 6 割込まれる回数

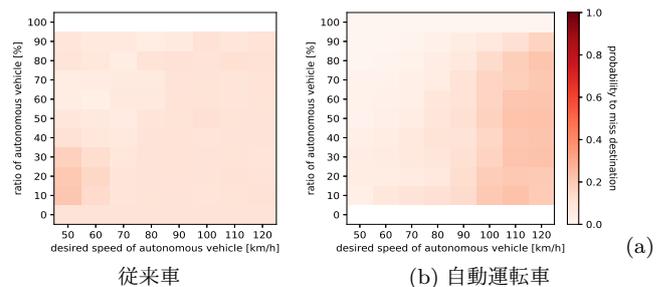


図 7 目的地を逃す確率

と速達性が向上したと考えられる。

ストレスを評価する指標の変化を図 5, 6, 7 に示す。従来車の希望速度と走行速度の差は、自動運転車の希望速度が 70[km/h] 以下のとき、混在率の増加に伴って大きくなる。一方、自動運転車の希望速度が 80[km/h] 以上では、自動運転車の希望速度を大きくするほど、自動運転車の希望速度と走行速度の差は増加する。これは自動運転車の希望速度が 70[km/h] 以下のときは、従来車の平均速度より遅い自動運転車に追従するケースが増加し、80[km/h] 以上のときは、自動運転車が速度の遅い従来車に追従するケースが増加するためと考えられる。従来車が自動運転車に割込まれる回数は、自動運転車の希望速度が 80[km/h] 以上で混在率が 40 ~ 80[%] のとき、自動運転車が従来車を追い越すケースが増加するため、その他の状況と比較して増加する。自動運転車が従来車に割込まれる回数は自動運転車の希望速度によって変化しない。従来車が目的地を逃す確率は、自動運転車の希望速度が制限速度以下で混在率が 10 ~ 30[%] のとき、速度の大きい従来車が自動運転車を追い越し、元の車線に戻る際に速度が大きいため十分な車間距離を確保できないケースが増加するため、その他の

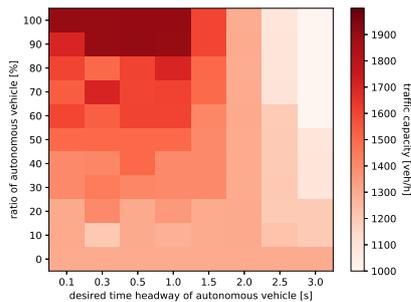


図 8 交通容量の変化

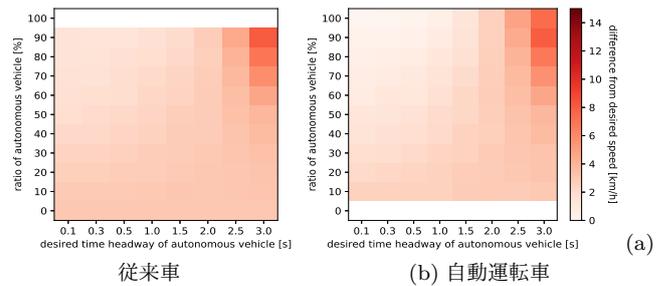


図 10 希望速度と走行速度の差の変化

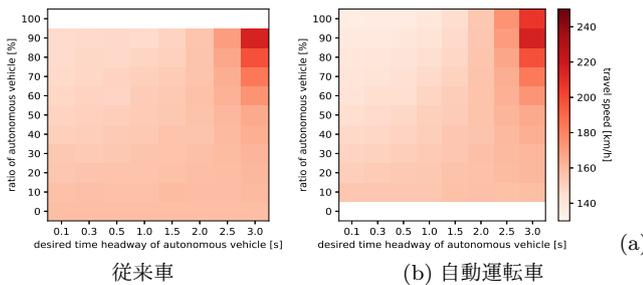


図 9 旅行時間の変化

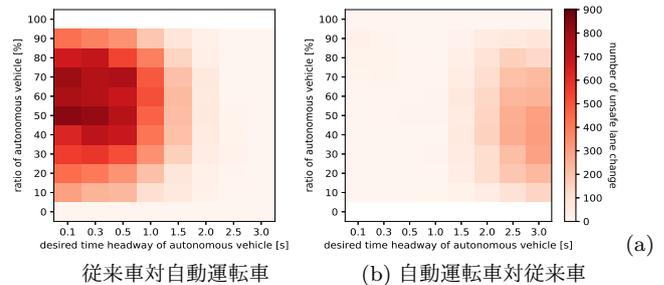


図 11 割込まれる回数

状況と比較して増加する。自動運転車の目的地を逃す確率は、自動運転車の希望速度が 100[km/h] 以上のとき、自動運転車が従来車を追い越し、元の車線に戻れないケースが増加するため、その他の状況と比較して増加する。

以上の結果をまとめると、自動運転車の希望速度は、混在率が 20[%] 以下の場合、70 ~ 80[km/h] に、混在率が 30[%]、もしくは 90[%] 以上の場合 90[km/h] に、混在率が 40 ~ 80[%] のときは 70[km/h] に設定すると、交通の効率性と速達性を向上させつつ、乗員のストレスを最小限に抑えた走行が可能になる。

#### 4.4.2 シナリオ II

シナリオ II における交通容量、旅行時間の変化を図 8, 9 に示す。交通容量は、自動運転車の希望車頭時間が 1.5[s] 以下でその混在率が 30[%] 以上のとき、従来車だけの環境と比較すると増加する。旅行時間は、従来車と自動運転車共に、自動運転車の希望車頭時間が 1.5[s] 以下の場合、混在率の増加に伴い若干減少する。これは、自動運転車の希望車頭時間が 1.5[s] 以下に設定すると、各車両の車間距離が小さくなり道路の占有率が增加するために、交通の効率性と速達性が向上したと考えられる。

ストレスを評価する指標の変化を図 10, 11, 12 に示す。希望速度と走行速度の差は、従来車と自動運転車共に、自動運転車の希望車頭時間が 1.5[s] 以下の場合、混在率の増加に伴い各車両の車間距離が小さくなるために、若干減少するが、自動運転車の希望車頭時間が 2.5[s] 以上の場合、混在率の増加に伴い各車両の車間距離が大きくなるため増加する。従来車が自動運転車に割込まれる回数は、自動運転車の希望車頭時間が 1.5[s] 以下の場合、他の状況と比較して増加する。特に自動運転車の希望車頭時間が 0.5[s]

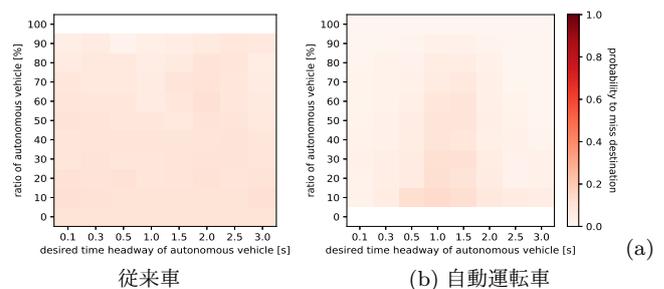


図 12 目的地を逃す確率

以下で混在率が 30 ~ 80[%] のとき、顕著に増加する。自動運転車が従来車に割込まれる回数は、自動運転車の希望車頭時間が 2.5[s] 以上の場合、増加する。特に混在率が 20 ~ 70[%] のとき、顕著に増加する。これは自動運転車の希望車頭時間に比例して最低車間距離が定まり、最低車間距離を基準に車線変更が安全か否か判断するためである。目的地を逃す確率は、従来車と自動運転車共に、自動運転車の希望車頭時間に関わらず変化しない。

以上の結果をまとめると、自動運転車の希望車頭時間は、混在率が 20[%] 以下の場合、1.0 ~ 2.0[s] に、混在率が 30[%] 以上の場合、1.0 ~ 1.5[s] に設定すると、交通の効率性と速達性を向上させつつ、乗員のストレスを最小限に抑えた走行が可能になる。

## 5. 結論

本研究では、運転の操作から判断までの遅延時間を、従来車だけの環境で妥当性が検証されている既存の運転挙動モデルに組み込むことで従来車と自動運転車の違いを再現した。また、希望速度と希望車頭時間のパラメータを介して、従来車のドライバの運転特性のばらつきを再現し、自動運

転車の運転挙動を反映した。これらのモデルを既存のマルチエージェントシミュレータ Scenarie 上へ実装し、従来車と自動運転車が混在する環境を再現した。この環境上において交通シミュレーションを実施し、自動運転車の運転挙動とその混在率が交通流と乗員のストレスに与える影響を把握した。交通流の良し悪しは、効率性、速達性という観点から評価を行い、乗員のストレスは速度低下による焦り、割り込み事故や目的地を逃すことに対する不安から生じるストレスを対象に評価を行った。シミュレーションの結果、制限速度 60[km/h] の道路において、混在率が 20[%] 以下の場合、自動運転者の希望速度は 70 ~ 80[km/h] に、自動運転車の希望車頭時間は 1.0 ~ 2.0[s] に設定し、混在率が 30[%], もしくは 90[%] 以上の場合は 90[km/h], 1.0 ~ 1.5[s] に、それ以外の場合は 70[km/h], 1.0 ~ 1.5[s] に設定すると、交通の効率性と速達性を向上させつつ、乗員のストレスを最小限に抑えた走行が可能になることがわかった。

今後の課題としては、合流部や交差点付近等、多車線直線道路よりも車線変更が頻発する道路環境における評価や自動運転車専用レーンの効果検証が挙げられる。

#### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP16KT0106 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部:官民 ITS 構想・ロードマップ 2017, (オンライン), 入手先 (<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20170530/roadmap.pdf>) (参照 2018/01/23).
- [2] 自動車検査登録情報協会:自動車検査登録情報協会自動車保有台数, (オンライン), 入手先 (<https://www.airia.or.jp/publish/statistics/number.html>) (参照 2018/01/23).
- [3] Goodyear, London School of Economics: A Study on How Drivers Feel about Interacting with Autonomous Vehicles on The Road, (online), available from (<http://www.lse.ac.uk/website-archive/newsAndMedia/PDF/AVs-negotiating-a-place-on-the-road-1110.pdf>) (accessed 2017/02/07).
- [4] Space-Time Engineering, LLC: Scenarie 2.1, (online), available from (<http://www.spacetime-eng.com/jp/products.html>) (accessed 2017/02/08).
- [5] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E*, Vol. 62, pp. 1805–1824 (2000).
- [6] 小川和久: ドライバーの感情特性と運転行動への影響, 研究調査プロジェクト報告資料 (2009).
- [7] 構造計画研究所: 交通シミュレーション PTV Vision, (オンライン), 入手先 ([http://www4.kke.co.jp/ptv-vision/vissim\\_top.html](http://www4.kke.co.jp/ptv-vision/vissim_top.html)) (参照 2017/02/01).
- [8] M. Behrisch, L. Bieker, J. Erdmann, and D. Krajzewicz: SUMO Simulation of Urban MObility: An Overview, *Proc. of The Third International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL 2011)*, pp. 1–6

- (2011).
- [9] J. Eggert, F. Damerow, and S. Klingelschmitt: The Foresighted Driver Model, *Proc. of 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2015)*, pp. 322–329 (2015).
- [10] Olstam, J. and Tapani, A.: Enhancements to the intelligent driver model, *Transportation Research Board 89th Annual Meeting*, Transportation Research Board (2010).
- [11] Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M. and Helbing, D.: Adaptive cruise control design for active congestion avoidance, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 16, No. 6, pp. 668–683 (2008).
- [12] Zhou, M., Qu, X. and Jin, S.: On the impact of cooperative autonomous vehicles in improving freeway merging: a modified intelligent driver model-based approach, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 18, No. 6, pp. 1422–1428 (2017).
- [13] Xiao, L., Wang, M. and van Arem, B.: Realistic car-following models for microscopic simulation of adaptive and cooperative adaptive cruise control vehicles, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2623, pp. 1–9 (2017).
- [14] P.G. Gipps: A behavioral car following model for computer simulation, Vol. 15, No. 2, pp. 105–111 (1981).
- [15] Erdmann, J.: SUMO's lane-changing model, *Modeling Mobility with Open Data*, Springer, pp. 105–123 (2015).
- [16] Kesting, A., Treiber, M. and Helbing, D.: General lane-changing model MOBIL for car-following models, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1999, pp. 86–94 (2007).
- [17] Schakel, W., Knoop, V. and van Arem, B.: Integrated lane change model with relaxation and synchronization, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2316, pp. 47–57 (2012).
- [18] F. Marczak, W. Daamen, and C. Buisson: Key variables of merging behaviour: empirical comparison between two sites and assessment of gap acceptance theory, *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, Vol. 80, pp. 678–697 (2013).
- [19] Wang, J.: A simulation model for motorway merging behaviour, *Transportation and traffic theory*, Vol. 16, pp. 281–301 (2005).
- [20] M. Wang and W. Daamen and S. P. Hoogendoorn and B. van Arem: Cooperative Car-Following Control: Distributed Algorithm and Impact on Moving Jam Features, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 17, No. 5, pp. 1459–1471 (2016).
- [21] Kelli Raboy, Jiaqi Ma, J. S. F. Z. K. R. E. L. L. I.: Cooperative Control for Lane Change Maneuvers with Connected Automated Vehicle: A Field Experiment, *Transportation Research Board 96th Annual Meeting* (2017).
- [22] Zijia Zhong, Joyoung Lee, L. Z.: Evaluations of Managed Lane Strategies for the Arterial Deployment of Cooperative Adaptive Cruise Control, *Transportation Research Board 96th Annual Meeting* (2017).
- [23] 飯田恭敬, 北村隆一: 交通工学, pp. 25–26, オーム社 (2008).
- [24] 神谷 枝里, 浅田 貴将, 安井一彦: ドライバーの規制速度に対する意識と実勢速度に関する研究, 日本大学理工学部学術講演会論文集, Vol. 38, pp. 347–348 (2009).
- [25] 遠藤孝夫, 武山泰, 堀井雅史, 村井貞規, 福田正: 交通工学, pp. 60–71, 朝倉書店 (1994).
- [26] 久保田尚, 大口敬, 高橋勝美: 読んで学ぶ交通工学・交通計画, pp. 27–29, 理工図書 (2010).