

手動運転車の混在を考慮した合流地点における 自動運転車の制御手法の検討

加藤 翔^{1,a)} 吉田 匡志^{2,b)} 山崎 玲^{2,c)} 重野 寛^{1,d)}

概要: 近年, センサによって取得した情報を車両通信によって共有することで自動運転車を協調制御することが期待されている. 協調制御を用いることで車両の衝突回避や交通流の改善が可能であり, 特に高速道路上の合流地点での活用が期待される. しかし, センサや通信機能を持たない手動運転車が混在する場合, 自動運転車は全ての手動運転車を検知することができない. そのため, 混在環境では車両の衝突を協調制御によって防ぐことが困難である. 本稿では手動運転車の混在を考慮した合流地点における自動運転車の制御手法の検討を行う. 提案手法は自動運転車のセンサにて検知不可能な手動運転車が存在すると仮定し, 手動運転車が他車両と同じ時刻に合流地点に進入しないように自動運転車を制御する. 自動運転車の車速を制御することで検知不可能な車両が合流可能な機会を増加させる. 結果, 合流地点における車両同士の衝突を未然に防ぐことが可能である. シミュレーションにより既存手法との比較を行い, 提案手法が自動運転車の普及率が低い状況において衝突の回避に伴う急減速を低減することを示す.

1. はじめに

現在, 都市部を中心に交通渋滞が問題となっている. 国内では年間約 50 億時間が渋滞によって失われている [1]. 渋滞は時間損失や経済的損失をもたらすだけでなく, 走行時間の増大による燃料消費や排気ガスの増大といった環境問題も引き起こす.

交通渋滞を引き起こす要因の一つが高速道路上での合流である. 合流地点においては本線及び合流車線が一所に集中するため交通のボトルネックとなる. 合流時には本線を走行する車両と合流車線を走行する車両が速度を調整しながら合流動作を行うため車速が低下する. また, 本線を走行する車両と合流車線を走行する車両が合流地点で横並びになった場合, 一方の車両は衝突を避けるために急減速をする必要がある. 車速の減少によって合流地点付近の交通流が停滞し, 交通渋滞が発生する.

近年, ITS (Intelligent Transport System) や自動運転技術の発展とともに, 自動運転車による交通流の改善手法が注目を集めている. 自動運転車は V2V (Vehicle-to-Vehicle)

通信や V2I (Vehicle-to-Infrastructure) 通信を用いて, 自車の車両情報や車載センサにより取得した周辺の車両情報および道路状況を共有することが可能である. これらの情報を基に事前に走行軌跡を決定することで自動運転車同士が協調的に走行することが可能となる. 特に合流部においては, 事前に合流時刻を共有しておくことで速度を落とすことなく円滑な合流が可能となる.

自動運転車の制御において手動運転車が混在する場合を考慮することも交通流の改善と同等に重要である. 国土交通省の報告によると国内の自動運転車の普及率は 2035 年で約 2-3 割になると想定されており [2], 自動運転車が普及していく過程にて自動運転車と手動運転車が道路上で混在する環境が発生する.

自動運転車の制御手法として, 全ての車両が自動運転車であることを想定した手法が数多く提案されている. 先行研究にて自動運転車が手動運転車と比較し, 交通流の改善及び交通渋滞の緩和に効果的であることが示されている [3]. しかし手動運転車が混在する場合, 先行研究の自動運転車の制御に悪影響を及ぼす. 特に自動運転車のセンサで検知不可能な車両が存在する場合, 手動運転車と自動運転車が同じ時刻に合流地点に到達する可能性がある. その結果, 合流地点付近で衝突を回避するための急減速が生じる.

手動運転車が混在する場合の車速の減少を低減するために, 手動運転車が混在する場合を想定した自動運転車の制

¹ 慶應義塾大学理工学部情報工学科
Faculty of Science and Technology, Keio University
² 慶應義塾大学理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University
a) kato@mos.ics.keio.ac.jp
b) yoshida@mos.ics.keio.ac.jp
c) yamazaki@mos.ics.keio.ac.jp
d) shigeno@mos.ics.keio.ac.jp

御手法が提案されている。しかし、センサで検知不可能な手動運転車が混在する場合の考慮が不十分である。結果、既存手法では検知不可能な車両による車速の減少を低減できない。

本稿では手動運転車の混在を考慮した合流地点における自動運転車の制御手法の検討を行う。本稿における提案手法は車載センサにて検知不可能な手動運転車の存在を仮定し、手動運転車が合流地点で衝突しないように自動運転車の合流時刻を決定する。提案手法では自動運転車を先頭とする車両群を形成する。形成された車両群は自動運転車の走行に影響を受ける手動運転車を含み、車両群内に検知不可能な車両の存在を仮定している。異なる車両群が同じタイミングで合流しないように先頭の自動運転車の合流時刻を決定することで車両群内の検知不可能な手動運転車の衝突を防止することが可能である。結果、手動運転車の衝突回避に伴う急減速を低減することが可能である。シミュレーション評価により、提案手法が衝突回避に伴う急減速を低減することを確認する。

第2章にて関連研究について述べる。第3章にて提案手法の説明を行う。第4章にてシミュレーション評価と考察を行う。第5章で結論を述べる。

2. 関連研究

本章では高速道路の合流地点における自動運転車の制御手法に関して述べる。

2.1 自動運転車の協調制御による交通流改善手法

ITS技術や自動運転技術の発展により、V2V及びV2I通信を用いて自動運転車を制御する手法が提案されている。V2V通信を用いた手法では、自動運転車が周辺車両から取得した走行情報を用いて合流時刻を各々の車両が自律的に決定する[3]。しかし、自動運転車は独立して合流時刻を決定するため全体の交通流を最適化する合流時刻を決定することが困難である。V2I通信を用いた手法では自動運転車の合流時刻をコントローラが計算する。全ての車両から車両情報を取得することで、コントローラは全車両の最適な合流時刻を計算することが可能である。コントローラによる自動運転車の合流時刻の決定方法は様々な研究がなされており、主に最適化ベース、ルールベースの二種類に分類することが出来る。最適化ベースによる手法では目的関数に従って全車両の合流時刻を決定する。結果、全体の交通流を最適化することが可能である。目的関数としては、旅行時間の最小化[4]、車速の最大化[5]などが提案されている。しかし最適化ベースの手法では計算する車両数の増加に伴い、計算時間が増加してしまうという問題がある。ルールベースによる手法ではヒューリスティックな解法を用いることで計算時間を抑えることが出来る[6]。一方で交通流の最適性が低下するという問題がある。

2.2 自動運転車の普及率を考慮した研究

上述のように、近年では交通流を円滑化する手段として自動運転車がV2V通信やV2I通信を用いる手法が目まぐるしく注目されている。しかし、上述の手法は全ての車両が自動運転車であることを前提としている。自動運転車の完全な普及は長期にわたることが想定されている。故に、手動運転車の存在を考慮した自動運転車の制御手法の提案が必須である。

Kreidiehらは、強化学習により自動運転車の挙動を決定することで自動運転車の普及率が低い状況でも合流時の減速を軽減可能であることを示した[7]。Riosらは自動運転車の普及が燃料消費や交通流に与える影響について調査を行った[8]。Riosらの手法では合流順序はFIFO(First-In First-Out)に従い、合流軌跡のみを最適化している。Dingらは手動運転車が混在する環境において、自動運転車の最適な合流順序決定手法を提案した[9]。Dingらの研究により、自動運転車の普及率が低い状況では手動運転車の合流時の減速により交通流が悪化することが示されている。一方で、自動運転車の普及率が30%程度になると十分に交通流を改善することが出来ると結論付けている。

本稿ではDingらの研究に着目する。Dingらは自動運転車の普及率による合流時の車両の軌跡や、交通流などへの影響を分析している。この手法では手動運転車の合流時刻を予測し、自動運転車の合流順序は手動運転車の合流予定時刻と重複しないように決定される。しかし、合流順序を決定する際に、自動運転車のセンサによって検知不可能な車両の存在を考慮していない。故に、自動運転車がセンサによって検知不可能な車両と同時に合流地点に進入してしまう。さらに、手動運転車の合流時刻を制御することが出来ないため手動運転車同士が同時に合流地点に進入してしまう。結果、衝突を回避するための急減速が発生し車速の減少により交通流の悪化を引き起こす。

3. 提案手法

本稿では手動運転車の混在を考慮した合流地点における自動運転車の制御手法の検討を行う。本稿における提案手法は車載センサにて検知不可能な手動運転車が衝突せずに合流できるように自動運転車の合流時刻を決定する。自動運転車を制御することによって後続する検知不可能な手動運転車を間接的に制御する。手動運転車を間接的に制御するために、提案手法は自動運転車を先頭とする車両群を形成する。車両群は先頭の自動運転車、及び後続の手動運転車にて構成される。コントローラは道路上に複数の車両群を形成し、個々の車両群が同じタイミングで合流しないように自動運転車の合流時刻を設定することで車両群内の検知不可能な手動運転車が合流地点で衝突する機会を低減する。

3.1 想定環境

本節はシステムモデル，手動運転車の挙動，自動運転車の挙動から成る．変数の定義を表 1 に示す．

表 1 変数の定義

変数	定義
L	コントロールゾーンの長さ
S_1	合流ゾーンの長さ
S_2	プレ合流ゾーンの長さ
v_i	車両 i の速度
a_i	車両 i の加速度
v_{min}, v_{max}	最低速度，最高速度
a_{min}, a_{max}	最大減速度，最大加速度
M_i	i 番目に本線から合流ゾーンに進入する車両
R_i	i 番目に合流車線から合流ゾーンに進入する車両
V_i	i 番目に合流ゾーンに進入する車両 $V_i = \{M_i, R_i\}$
p_i	車両 i の位置

3.1.1 システムモデル

本稿における合流地点の想定環境を図 1 に示す．本稿では本線及び合流車線が各一車線の高速道路を想定する．道路上にはコントロールゾーン，プレ合流ゾーン，合流ゾーンの 3 つの領域が指定されている．両車線は合流ゾーンで交わり一車線となる．システムモデルは自動運転車，手動運転車，コントローラで構成される．

手動運転車

手動運転車は通信機能を持たない車両であり，協調走行をすることが出来ない．通常走行時は前走車との間隔のみを考慮して走行する．合流時にはプレ合流ゾーンにて本線上の走行状況を確認し，合流するために十分なスペースがあれば合流を行う．十分なスペースがない場合，合流可能なスペースが出現するまで合流車線上にて待機する．

自動運転車

自動運転車は V2I 通信を行うための車載器，および周辺車両の走行情報を取得するための車載センサを備えている．コントロールゾーンに進入すると V2I 通信により位置や速度などの自車情報をコントローラへ送信する．また，車載センサにより前後一台ずつの車両情報を検知し，自車の情報と同時にコントローラへ送信する．自動運転車による通信やセンサによる検知は，一定時間ごとに誤差や遅延なく行われるものとする．自動運転車はコントローラから割り当てられた合流時刻に合流ゾーンへ進入するよう自車の速度を調整する．

コントローラ

コントローラは合流ゾーン付近に設置されており，自動運転車から道路上の車両情報を受信する．受信した情報を基にコントロールゾーン内を走行する全ての自

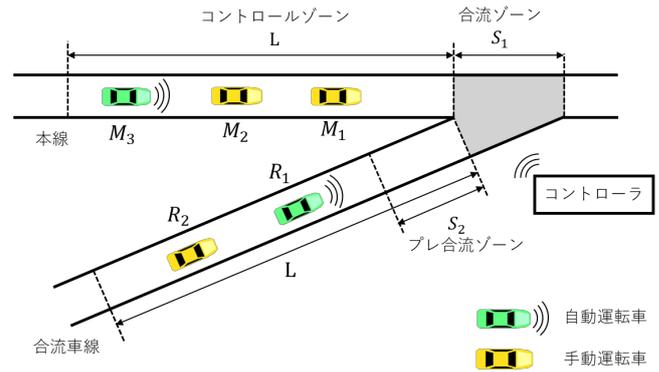


図 1 想定環境

動運転車の最適な合流順序を決定する．合流順序を決定した後各車両の合流時刻を決定する．合流時刻の決定後，各自動運転車に合流時刻を V2I 通信により送信する．

3.1.2 手動運転車の挙動

手動運転車は前走車が存在しない場合には最高速度で走行するものとする．前走車が存在する場合にはその挙動は Gipps の車両追従モデルに従うものとする [10]．Gipps の車両追従モデルでは前走車の車速や前走車との車間距離を考慮している．自由走行時には最高速度を目指して走行し，混雑時には前走車と安全な距離を保ちながら走行する．

手動運転車はプレ合流ゾーンに進入すると本線の車両を見渡すことが可能となり，合流が可能なスペースが存在するかを判断する．合流が不可能であると判断した場合には衝突を回避するために減速を行い，合流可能なスペースが現れるまで待機する．図 2 に合流スペースの判断基準を示す．図 2 中の gap_1 ， gap_2 は車両間の合流時刻差であり，式 1，2 により計算される．

$$gap_1 = \frac{p_{i-1}(t) - p_i(t)}{v_i(t)}, \quad (1)$$

$$gap_2 = \frac{p_i(t) - p_{i+1}(t)}{v_{i+1}}, \quad (2)$$

ここで p_i は車両 V_i のコントロールゾーン入口からの距離を示す． gap_1 ， gap_2 がともに閾値 gap_{th} を上回る場合には，車両 V_i は車両 V_{i-1} を前走車として Gipps の車両追従モデルに従って走行する．

3.1.3 自動運転車の挙動

自動運転車は自由走行時にはコントローラから与えられた合流時刻に合流ゾーンへ進入するように車速を調整する．具体的には式 3 に従い，速度及び加速度の制約を満たした上で，加減速を最小にするように走行する．

$$\min_{a_i} \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{assign}^i} a_i^2(t) dt. \quad (3)$$

$$s.t. \quad v_{min} \leq v_i \leq v_{max}, \quad (4)$$

$$a_{min} \leq a_i \leq a_{max}, \quad (5)$$

ここで t_{assign}^i は車両 V_i がコントローラにより与えられた

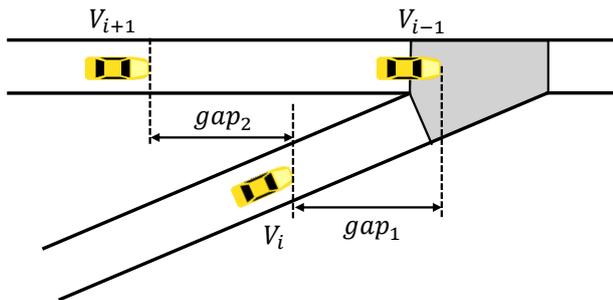


図 2 合流スペースの判断基準

合流時刻, t_0 は現在時刻を示す。ただし安全のため、前走車との車間距離が d_{min} を下回る場合には、車間距離を保ちながら追従走行をするものとする。

車両は前走車との間に最低限の合流時刻差 ΔT を確保する必要がある。同車線を走行する前走車との間に確保する必要がある最低合流時刻差を ΔT_1 、合流時に異なる車線を走行する前走車との間に確保する必要がある最低合流時刻差を ΔT_2 とする。

自動運転車はプレ合流ゾーンに進入するとセンサにより本線の状況を確認し、未検知の手動運転車が走行している場合にはその前後に合流が可能なスペースがあるかを判断する。合流の可否は式 1, 2 により判断する。合流が不可能であると判断した場合には、衝突を回避するため減速し合流可能なスペースが出現するまで待機する。

3.2 車両群の形成

コントローラは自動運転車から取得した自車情報およびセンサ情報を用いて自動運転車および手動運転車を車両群化する。合流は車両群ごとに行われ、本線と合流車線の車両が同じタイミングで合流地点に進入することがないように合流時刻が決定される。

3.2.1 車両群の定義

同一車線において任意の自動運転車を先頭車両とし、後続する異なる自動運転車の手前の車両までを同一の車両群とする。自動運転車が二台連続する場合、前方の自動運転車は一台で車両群を形成する。車両群 G_i は以下のように定義される。

$$G_i = \{V_{(i,1)}, \dots, V_{(i,m)}\}, m \geq 1. \quad (6)$$

図 3 に車両群の概要を示す。式 6 の定義より、車両群 2 は $G_2 = \{R_1, R_2, R_3, R_4\}$ となる。自動運転車 R_2, R_4 は自動運転車 R_1, R_5 の車載センサによってそれぞれ検知可能である。同時に、コントローラも R_2, R_4 の存在を R_1, R_5 と共有することが可能である。しかし、手動運転車 R_3 はどの自動運転車からもその存在を検知することができない。提案手法は車両群が同じタイミングで合流地点に進入しないように合流時刻を決定することで、 R_3 のようなセ

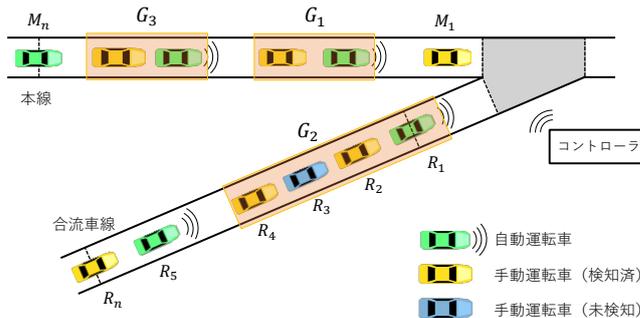


図 3 車両群の概要

ンサによって検知不可能な手動運転車が他車両と衝突する機会を低減する。

3.3 合流順序の決定

3.2.1 節にて自動運転車と手動運転車による車両群を形成した。本節では各車両の最適な合流順序の決定手法について述べる。各車両の合流順序は、合流時の衝突機会の低減および全車両の旅行時間の総和の最小化を目的として決定する。図 3 において M_1 は手動運転車であるため、その合流タイミングを調整することが出来ない。そのため、 M_1 は最初に合流地点を通過する。 M_n, R_5, R_n はコントロールゾーンに新しい車両が進入した際に車両群が更新される可能性があるため、合流順序を最後とする。

その他の車両群の合流順序は旅行時間の最小化を目的として決定する。具体的には同じ車線上に存在する車両群を連続して合流させるように合流順序を決定する。同じ車線上に存在する車両群を連続して合流させることで、異なる車線を走行する車両との最低合流時刻差 ΔT_2 の出現頻度を低減する。一般的に、異なる方向から車両が安全に合流するために、 ΔT_2 は同一車線を走行する車両の最低合流時刻 ΔT_1 よりも長く設定される [6]。故に、 ΔT_2 の出現頻度を低減するように車両群の合流順序を決定することで旅行時間の最小化が達成される。同一車線上に車両群 G_{i-1}, G_i が存在し、 G_i 内の先頭車両 $V_{(i,1)}$ の最短合流時刻 $t_{min}^{V_{(i,1)}}$ が下記の条件を満たすとき、 G_i を G_{i-1} と連続して合流させる。

$$t_{min}^{V_{(i,1)}} \leq t_{assign}^{V_{(i-1,m)}} + \Delta T_1, \quad (7)$$

ここで $t_{assign}^{V_{(i-1,m)}}$ は車両 $V_{(i-1,m)}$ に割り当てられた合流時刻を示す。式 7 を満たさない場合には各車線において合流順序が未決定の車両群のうち、最短合流時刻が早いものを次に合流させる。

3.4 合流時刻の設定

コントローラは決定された合流順序をもとに各車両の合流時刻を設定する。自動運転車 V_i の合流時刻 t_{assign}^i は式 8 により決定する。

$$t_{assign}^i = \begin{cases} \max\{t_{assign}^{i-1} + \Delta T, t_{min}^i\} \\ (V_{i-1} \text{が自動運転車の場合}), \\ \max\{t_{pred}^{i-1} + \Delta T, t_{min}^i\} \\ (V_{i-1} \text{が手動運転車の場合}), \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta T = \begin{cases} \Delta T_1 & (V_{i-1} \text{が同車線を走行する場合}), \\ \Delta T_2 & (V_{i-1} \text{が異車線を走行する場合}), \end{cases} \quad (9)$$

$$t_{pred}^i = \frac{L - p_i(t)}{v_i(t)}, \quad (10)$$

ここで t_{assign}^i , t_{min}^i , t_{pred}^i はそれぞれ、自動運転車 i に割り当てられた合流時刻、自動運転車 i の最短合流時刻、手動運転車 i の予測合流時刻を示す。 t_{pred}^i は式 10 に従い手動運転車が等速で動くものとして計算される。

4. シミュレーション評価と考察

シミュレーションにより提案手法が自動運転車の普及率が低い状況において衝突の回避に伴う急減速を低減することを示す。シミュレーションには交通シミュレータ SUMO[11] を用いた。比較対象には既存手法 [9] を用いる。シミュレーション諸元を表 2 に示す。車両はランダム時間に各車線へ流入する。速度、加速度のパラメータは全車両に共通とした。評価基準として、合流時の車両軌跡および全車両の平均速度を用いる。

自動運転車の普及率を 10 % 刻みで変更し、その影響について考察する。

シミュレーション時間	600 [s]
車両流入台数	1800 [台/h]
L	200 [m]
S_1, S_2	20, 40 [m]
v_{min}, v_{max}	0, 60 [km/h]
a_{min}, a_{max}	-5, 3 [m/s^2]
$\Delta T_1, \Delta T_2$	1.5, 2.0 [s]
d_{min}	10 [m]
gap_{th}	2.0 [s]

4.1 合流時の車両軌跡

提案手法は合流時における手動運転車の衝突機会の低減を目的とした。衝突機会が発生すると衝突を避けるために車両が急減速する必要がある。そこで、既存手法と提案手法における合流時の車両軌跡について図 4 に示す。図 4 において、一つの線が一台の車両を表している。縦軸はコントロールゾーン入口からの距離を表しており、200m が合流地点である。

図 4 より既存手法においては合流地点付近にて赤い線が大きく歪んでいることが分かる。これは本線の車両と合流

車線の車両が同時に合流地点に進入したために、合流車線の車両が衝突を回避するために急減速したことを表している。また、最初に歪んだ線の右側の線にも歪みが伝播しており、後続の車両も減速を強いられていることが読み取れる。提案手法においては合流地点を同じ車線の車両が連続して通過していることが読み取れ、車両群を形成していることが分かる。また、車両群の先頭の自動運転車が事前に車両群全体の合流時刻を調整することで、既存手法で見られた合流地点付近での急減速が抑制されていることが確認できる。

4.2 自動運転車普及率に対する平均速度の変化

図 5 に自動運転車普及率に対する平均速度の変化を示す。平均速度はコントロールゾーンおよび合流ゾーンを走行する全車両の車速の平均とする。本線と合流車線の車両流入比は 1 : 1 とした。

自動運転車普及率 100 % では全ての車両は車両通信により協調走行することができ、合流時の減速は発生しない。自動運転車普及率 0 % では道路上の全ての車両が手動運転車であり、協調走行をすることは出来ない。そのため、合流時の減速が多発し、交通流が悪化する。

既存手法、提案手法ともに自動運転車の普及率上昇に伴い、平均速度が増加する傾向が見られる。これは、協調走行により円滑に合流することができる車両が増加するためと考えられる。また、自動運転車の割合が増加すると検知不可能な手動運転車も減少するため、合流直前でそのような車両を発見する事による急減速の機会も減少する。

既存手法と比較して提案手法では自動運転車の普及率が低い状況において、平均速度が高くなっていることが分かる。自動運転車普及率 40 % において平均速度を約 13 % 向上することを確認した。これは 4.1 節で述べたように車両群の形成により、合流直前での減速を抑制し円滑な合流が行われているためと考えられる。一方で、自動運転車普及率が 80 % 以上の高い状況では提案手法は既存手法よりも平均速度が減少している。この原因としては、提案手法における合流順序の決定手法が関係すると考えられる。提案手法では未検知の車両の存在を考慮して各車両の合流順序を決定しているが、自動運転車普及率が高い状況では未検知車両がほとんど存在しないため、結果として効率の悪い合流順序となってしまっていることが考えられる。

5. 結論

本稿では手動運転車の混在を考慮した合流地点における自動運転車の制御手法の検討を行った。提案手法では、道路上の車両を車両群化し車両群ごとの合流を行った。車両群は自動運転車のセンサにて検知不可能な手動運転車を内包する。車両群先頭の自動運転車が協調走行をすることができない手動運転車を含めた車両群全体の合流時刻を調整

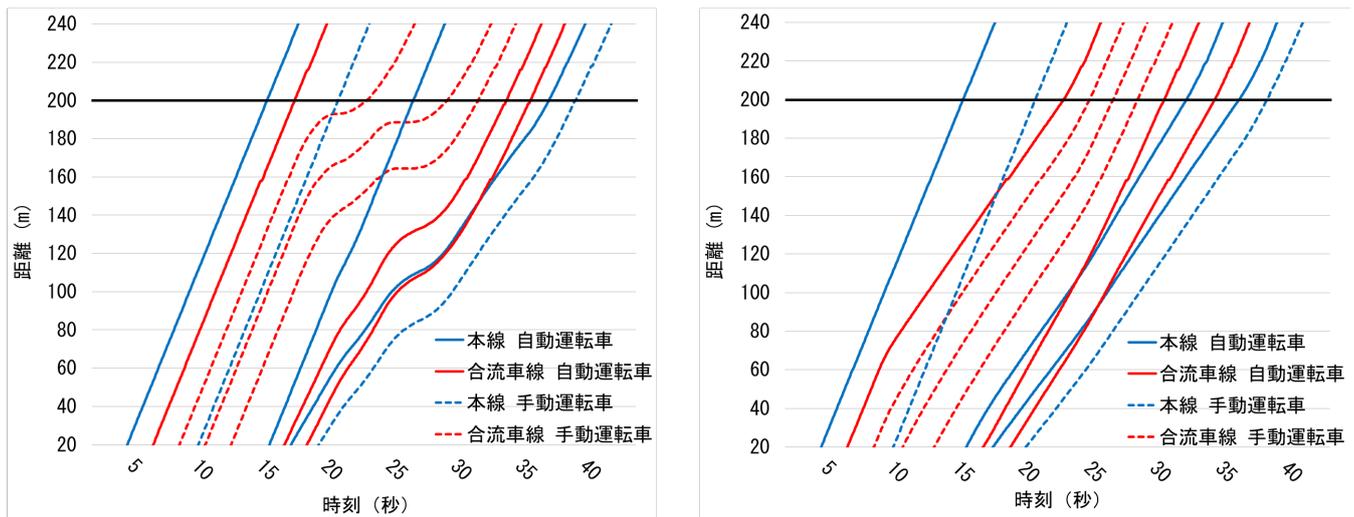


図 4 左：既存手法における合流時の車両軌跡 右：提案手法における合流時の車両軌跡

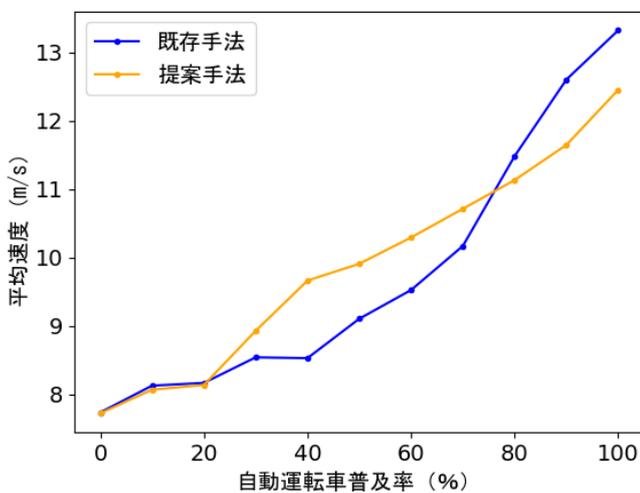


図 5 自動運転車普及率に対する平均速度の変化

することで、合流時における手動運転車の衝突回避による急減速の抑制を目指した。シミュレーション評価により、提案手法では車両群の形成により本線と合流車線をそれぞれ走行する二台の車両が同時に合流地点に進入する機会を削減し、合流時の急減速を抑制できることを確認した。また、提案手法は既存手法と比較して自動運転車普及率が低い場合において交通流を改善することを確認した。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H04180 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 国土交通省, 高速道路を中心とした「道路を賢く使う取組」の基本方針, (2021.02.01) .
- [2] 国土交通省, 自動運転に対応した道路空間に関する検討会(第5回), (2021.02.01) .
- [3] J. Rios-Torres and A. A. Malikopoulos, "A Survey on the Coordination of Connected and Automated Vehicles at Intersections and Merging at Highway On-Ramps,"

- IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 18, no. 5, pp. 1066-1077, May 2017.
- [4] G. Raravi, V. Shingde, K. Ramamritham, and J. Bhargava, "Merge algorithms for intelligent vehicles," in Next Generation Design and Verification Methodologies for Distributed Embedded Control Systems. Dordrecht, The Netherlands: Springer, pp. 51-65, 2007.
- [5] C. Letter and L. Elefteriadou, "Efficient control of fully automated connected vehicles at freeway merge segments," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 80, pp. 190-205, 2017.
- [6] J. Ding, L. Li, H. Peng and Y. Zhang, "A Rule-Based Cooperative Merging Strategy for Connected and Automated Vehicles," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 21, no. 8, pp. 3436-3446, Aug. 2020.
- [7] A. R. Kreidieh, C. Wu and A. M. Bayen, "Dissipating stop-and-go waves in closed and open networks via deep reinforcement learning," 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 1475-1480, 2018.
- [8] J. Rios-Torres and A. A. Malikopoulos, "Impact of Partial Penetrations of Connected and Automated Vehicles on Fuel Consumption and Traffic Flow," IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 3, no. 4, pp. 453-462, Dec. 2018.
- [9] J. Ding, H. Peng, Y. Zhang, L. Li, "Penetration effect of connected and automated vehicles on cooperative on-ramp merging," IET Intelligent Transport Systems, Vol. 14, pp. 56-64, 2020.
- [10] P.G. Gipps, "A behavioural car-following model for computer simulation," Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 15, pp. 105-111, 1982.
- [11] D. Krajzewicz, J. Erdmann, M. Behrisch, and L. Bieker, "Recent development and applications of SUMO-Simulation of Urban MObility," International Journal On Advances in Systems and Measurements, vol. 5, pp. 128-138, December 2012.