突発的障害物回避のための協調型車線変更制御における車々間通信機能の普及率の影響

淺野 心夏[1]　石原 進[2]

概要：車両事故や積載物の落下によって突発的に走行道路の一部が封鎖された場合，障害物を発見した車両が車々間通信を用いて広範囲に通知すれば，後続車両に障害物回避のための適切な制御をさせることができるため，安全かつ円滑な障害物回避の実現が期待される．筆者らは，障害物発見通知を受け取った車両に対して，障害物の近くに達するまでに徐々に車頭時間を通常の倍になるように拡大させ，障害物より少し離れた地点で余裕を持って車線変更をさせる戦略，及び全ての走行車線に対して公平に通過機会を与えるための協調型車線変更制御手法を提案した．交通流シミュレータ SUMO を用いた 3 車線道路におけるシミュレーションにより，車線間の公平性，乗客の乗り心地を悪化させることなく十分な総車両通過量を達成できることを確認した．しかしながら，これまでの評価では，車々間通信機能の普及率が 100%の場合のシミュレーションしか実施されていなかった．多少の非通信車両が混在したとしても十分な性能が維持されることが望ましいため，本稿では，車々間通信機能の普及率が提案手法の性能に与える影響を調査する．シミュレーションの結果，総車両通過量は普及率が低下するにつれて徐々に低下するものの，大幅に低下することはなく，普及率が 80%以上ならば影響は十分小さいことが確認できた．車線間の公平性は普及率が 0%のときに大幅に悪化したが，普及率が 10%以上ならば大幅な悪化は防止でき，提案手法を用いない場合に対する優位性を継続できることが確認できた．乗り心地は普及率が低下するにつれて段々と悪化したが，普及率が 60%以上ならば提案手法を使用しない場合に対して乗り心地の悪化抑止の効果が得られることが確認できた．

1. はじめに

車々間通信を用いた安全運転支援や自動運転技術の研究が盛んに行われている．これらの研究では，各車両が車々間通信を用いて自車両の走行情報（位置，速度等）を周辺車両と共有し，協調して走行することで，安全性の向上や交通流の効率化を目指している [1]．今日の道路環境において，車両事故や積載物の落下によって一時的に走行道路の一部が封鎖された場合，その障害物を中心として渋滞が生じてしまうだろう．車々間通信を用いて障害物の存在を広範囲に通知することができれば，事前に後続車両に障害物回避のための速度調整，車線変更の制御をさせることで，安全かつ円滑に障害物を回避できることが見込まれる．

石原らは [2] において，2 車線道路における障害物回避を想定して，車々間通信によって障害物発見通知を受け取った車両に対して，障害物の近くに達するまでに徐々に車頭時間を通常の倍になるように調整し，障害物より少し離れた地点で余裕を持って車線変更をさせる戦略を提案した．この戦略を基にして，筆者らは [3] において，多車線（3 車線以上）道路でも適用可能な戦略を提案した．この戦略では，車線間の公平性に焦点を合わせている．3 車線道路の末端車線が封鎖された場合を想定したとき，障害物の存在する車線の車両のみが車線変更をすると，中央車線に交通量は集中してしまい，その一方で障害物から離れた末端車線は通常通り走行できてしまう．このとき，障害物の存在する車線と中央車線を走行している車両は，障害物地点を通過することができる機会（以後，通過機会と呼ぶ）が半減してしまい，不公平である．

そこで [3] の提案手法では，全ての車線の車両に通過機会が平等に与えられている状態を目標として制御する．具体的には，障害物より上流にて移動先の車線候補が複数ある車両に対して，車々間通信によって取得した障害物の位置と各車線の車両密度に応じて移動先の車線を決定させることで，車線毎の交通量の偏りを軽減し，車線間の公平性を向上させる．交通流シミュレータ SUMO [4] を用いた 3 車線道路におけるシミュレーションにおいて，非通信車両のみの方式は車両流入量が大きい場合に車線間の公平性が大幅に悪化したのに対して，提案方式は車両流入量が大き

1 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻
2 静岡大学学術院工学領域

© 2021 Information Processing Society of Japan

くなっても車線間の公平性を十分保つことできることが確認できた．加えて，提案方式は非通信車両のみの方式と比較して最大 31%程度の車両通過量の増加が得られた．

しかしながら，これまでの評価では車々間通信機能の普及率が 100%の場合のシミュレーションしか実施されていなかった．また，非通信車両は基本的に直進しかせず，障害物を直接検知した場合のみ車線変更をするようになっており，簡易化されすぎていたため，非通信車両のみの方式のシミュレーション結果は確かさに欠けていた．提案手法において，多少の非通信車両が混在したとしても十分な性能が維持されることが望ましいため，本稿では，非通信車両をより現実的な挙動をするように改善した上で，車々間通信機能の普及率が提案手法の性能に与える影響を評価する．

以下，2 章で関連研究について述べ，3 章で提案手法について説明する．4 章で SUMO を用いたシミュレーションにより車々間通信機能の普及率の影響を調査する．5 章で非通信車両の混在時の性能低下の抑制方法を提案する．最後に，6 章で本稿をまとめる．

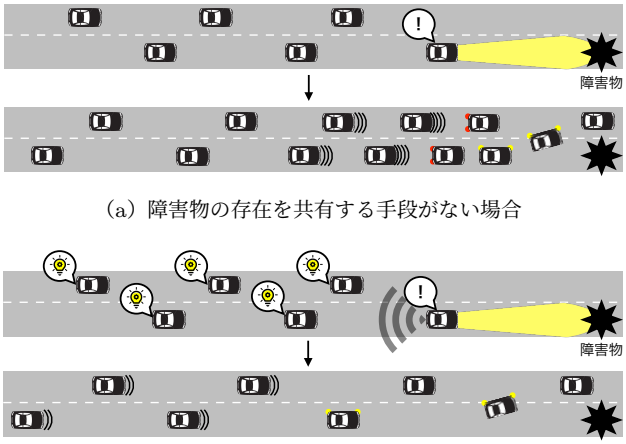
2. 関連研究

路車間，車々間通信を用いた合流支援，及び車々間通信を用いた障害物回避の先行研究について述べる．

2.1 路車間，車々間通信を用いた合流支援

路車間，車々間通信を用いた高速道路合流部における協調的な車線変更・受け入れ制御の研究が盛んに行われている [5] [6] [7]．合流車線の終点（合流車線が本線に交わる地点）を障害物と見なせば，障害物回避と合流は似た状況と言える．合流部に路側設備があることを前提として，路車間通信を用いて周辺車両の経路候補を路側設備に集約し，路側設備が総合的に判断して指示を出すことで円滑な合流に近づけることができる [5]．合流部の位置は定まっているため，あらかじめ設置された路側設備を利用することで統括した制御が可能になる．一方，障害物回避においては路側設備を利用できない地点に路上障害物が生じ得るため，路側設備に依存する制御手法は望ましくない．

C2C-CC（CAR 2 CAR Communication Consortium）では，高速道路合流部において，センシング情報の共有による周辺状況の把握技術（Collective Perception [8]）を用いて，通信機能を持っていない車両の存在を認識することで，合流支援制御における安全性の向上を目指している [6]．また，FHWA（Federal Highway Administration）では，自動協調型運転技術の検証及び評価を推進するためのオープンソースソフトウェアプラットフォーム CARMA（Cooperative Automation Research Mobility Applications）を開発しており，ここでも合流支援が取り扱われている [9]．CARMA を用いた合流支援では，路車間，車々間通信を用いて合流車両と本線車両の間で走行情報（位置，速度など）を交換し，本線車両は速度調整をしながら合流を促し，合流車両は加速しながら本線に入ることで円滑な合流の実現が試みられており，実証実験が進められている [7]．これらの合流支援技術では，合流付近に近づいた車両の限られた走行距離における急な動作を対象にしている．一方，本研究では障害物より上流にいる不特定多数の車両の広範囲にわたる緩やかな動作を対象にしている．



（a）障害物の存在を共有する手段がない場合

（b）車々間通信を用いて障害物の存在を共有した場合

図 1: 車々間通信を用いた障害物回避

2.2 車々間通信を用いた障害物回避

道路上に障害物が生じた場合，障害物が存在する車線を走行していて障害物を認知した車両は即座に車線変更を行うことが強いられてしまう．このとき，図 1(a) のように障害物直前で急な車線変更が集中して起こることで，車線変更・受け入れのための減速が頻発して渋滞が生じてしまうかもしれない．ここで，車々間通信を用いて障害物の存在を広範囲に通知することができれば，図 1(b) のように事前の速度調整や余裕を持った車線変更が可能となる．

石原らは，障害物を検知した車両が車々間通信を用いて障害物発見通知を後続車両に送信し，障害物と車両間の距離に応じて車線変更・その受け入れに対する積極性を制御して他車両と協調動作を行う手法を提案した [10]．さらに，[2] では，障害物より上流を走行する車両に対して，障害物に近づく前に車頭時間を通常の倍になるように加速度を制御する機能を加えている．交通流シミュレータ SUMO を用いた 2 車線道路におけるシミュレーションにおいて，非通信車両のみの方式と比較して最大 6%程度の車両通過量の増加が得られた．また，同方式では，車頭時間の調整を行わない方式と比較して，車線間の公平性をできるだけ維持しながら車両通過量を増大できることが確認された．

筆者らは，多車線（3 車線以上）道路を想定し，障害物より上流において移動先の車線候補が複数ある車両に対して，車々間通信によって取得した障害物の位置と各車線の

© 2021 Information Processing Society of Japan

車両密度に応じて移動先の車線を決定する戦略を提案した [3]．また，シミュレーションにおける性能評価の指標として新たに乗り心地（加速度とジャーク（加速度の変化率）に基づく不快度の累積値）を導入した．同様のシミュレータを用いた 3 車線道路におけるシミュレーションにおいて，車頭時間の調整を行わない方式と比較して最大 40% 程度の不快度の抑制が得られた．また，総合的には，提案方式が最も交通量，公平性，乗り心地の 3 つの指標をバランス良く満たしていることが確認された．しかしながら，ここでは車々間通信機能の普及率が 100%の場合のシミュレーションしか実施されていなかった．提案手法は障害物と車両間の距離に応じた単純なルールベースによって協調制御を実現しているが，ルールを知ることができない非通信車両が混在してしまうと，提案手法の効果が低下することが危惧される．そのため，本稿では車々間通信機能の普及率が提案手法の性能に与える影響を調査する．まず，次章にてこの提案手法の要点を述べる．

3. 多車線（3 車線以上）道路における突発的障害物回避のための協調型車線変更制御手法

本章では，筆者らによって提案された手法について述べる．この手法では，障害物発見通知とそれに応じた個々の車両の単純なルールに従った振舞いによって一部の車線を渋滞させることなく障害物を回避する．また，車々間通信によって取得した障害物の位置と各車線の車両密度に応じて各車両の移動先の車線を決定させることで，通過車線毎の車両通過量の偏りを軽減し，車線間の公平性を向上させる．

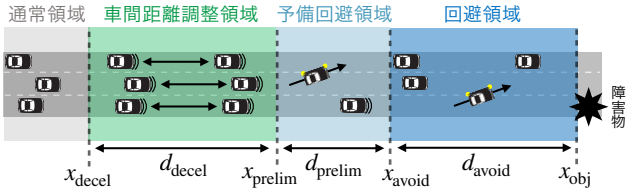
3.1 想定環境

本研究では以下の環境を想定している．

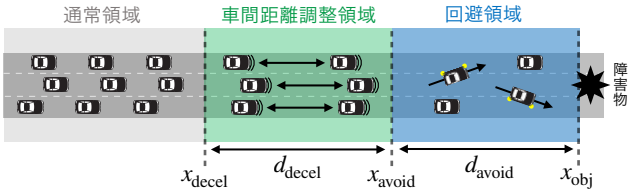
- 車両はカメラや LiDAR 等のセンサを搭載しており，車両や道路構造，障害物等を認識可能である．
- 車々間通信機能を備え，運転者に警告・操作指示を与えることができる車両，または車々間通信機能を備えた自動運転車両が普及している．運転者は指示に従って運転操作をする．
- 車両は自車両の走行情報（位置，速度等）を含むメッセージを頻繁にブロードキャストしており，自車両の通信可能範囲内ならば周辺車両の位置を把握しているものとする．

3.2 基本戦略

本手法では，障害物と車両間の距離に応じて道路上を 4 つの領域に区切り，障害物発見通知を受け取った各車両の存在する領域に応じて異なる制御を行う．図 2 に障害物と車両間の距離に応じた各車両の異なる制御を示す．ここでは，障害物の存在する車線（以後，**封鎖車線** と呼ぶ）を走行している車両には車線変更の制御，障害物の存在しない車線（以後，**通過車線** と呼ぶ）を走行している車両には車線変更を受け入れるための制御が求められ，各車両は障害物の位置 x_{obj} と自車両の位置 x（進行方向を正とした軸の座標）の間の距離 $d = x_{\mathrm{obj}} - x$ に応じて制御を決定する．$0 < d \leq d_{\mathrm{avoid}}$ の範囲（以後，**回避領域** と呼ぶ）では，封鎖車線の車両は車線変更を試みる．$d_{\mathrm{avoid}} < d \leq d_{\mathrm{avoid}} + d_{\mathrm{prelim}}$ の範囲（以後，**予備回避領域** と呼ぶ）では，通過車線の車両は車線変更を試みる（障害物から離れる方向に車線変更が可能な通過車線が存在しない場合はこの領域は省略する）．$d_{\mathrm{avoid}} + d_{\mathrm{prelim}} < d \leq d_{\mathrm{avoid}} + d_{\mathrm{prelim}} + d_{\mathrm{decel}}$ の範囲（以後，**車間距離調整領域** と呼ぶ）では，各車両は車間距離を徐々に広げる．$d_{\mathrm{avoid}} + d_{\mathrm{prelim}} + d_{\mathrm{decel}} < d$ の範囲（以後，**通常領域** と呼ぶ）では，各車両は障害物回避のための特別な制御はせず，通常通り走行する．



（a）シナリオ E (Edge-lane closed)



（b）シナリオ C (Center-lane closed)

図 2: 障害物と車両間の距離に応じた制御ルール

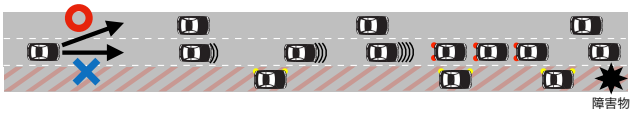
3.3 障害物発見通知

通信機能を持つ車両はカメラ，レーダー等のセンサで障害物を検知すると，障害物の位置，車線情報をブロードキャストによって後続車両に通知する．通知の配信範囲，配信方法は具体的にはここでは定義しないが，中継を伴わないブロードキャストのみ，あるいは適切な最適化を適用したフラッディングによって，数百 m ∼ 1 km 程度の範囲の同一道路を走行する後続車両に通知するものとする．障害物を検知した車両は障害物を超えるまで，定期的に同じメッセージを配信し続ける．

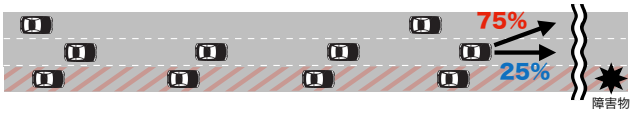
3.4 車頭時間の調整

車頭時間とは，前方の目標物を前走車が通過してから自車両がそこを通過するまでの時間のことである．車間距離調整領域を走行している車両は，現在の走行速度 v に照らして自身が $d = x_{\mathrm{obj}} - x < d_{\mathrm{avoid}}$ となる位置 x に到達するときに（予備回避領域がある場合は，$d < d_{\mathrm{prelim}}$ となる

© 2021 Information Processing Society of Japan



（a）戦略 1: 混雑車線の回避



（b）戦略 2: 車線間のバランス調整

図 3: 各車線の車両密度に応じた移動先の車線決定

位置 x に到達するときに）車頭時間が通常の倍になるように，徐々に減速して速度を調整する．ただし，車頭時間を増大させるための減速が急激であると乗り心地を悪化させるので，このときの加速度は a_{comfort} を下回らないようにする．また，a_{comfort} を下回らない限り，車頭時間の調整を完了していたい地点に到達するまでに車頭時間を理想まで広げられない場合は，その地点を過ぎても車頭時間を理想まで広げられるまで a_{comfort} で減速する．このように車頭時間を通常の倍にするのは，車線変更の実施に必要な車間距離を事前に確保するためである．

3.5 各車線の車両密度に応じた移動先の車線決定

両端の車線以外を走行する車両には車線変更先が複数存在する．障害物より上流において，移動先の車線候補が複数ある車両は，車々間通信によって取得した障害物の位置と各車線の車両密度に応じて移動先の車線を決定する．3 車線道路の末端車線が封鎖された場合を例にして，その手順を述べる．中央車線の車両は予備回避領域に入ったら，自車両の通信可能範囲内にいる車両台数を前方と後方でそれぞれカウントし，戦略 1（混雑車線の回避），戦略 2（車線間のバランス調整）によって移動先の車線を選択する．

戦略 1: 混雑車線の回避

図 3(a) に示すように，自車両と障害物との間の各通過車線の交通量に注目して，混雑している車線は回避する．まず，自車両より前方（通信可能範囲内まで）の車両の走行情報から各通過車線の車両台数を推定する．各車線の番号を $i = \{0, 1, 2\}$ とし，車線 0 を左端の通過車線，車線 1 を中央の通過車線，車線 2 を右端の封鎖車線とする．自車両より前方で車線 i を走行している車両台数を n_i とする．2 つの通過車線の車両台数の合計のうち，どちらかの通過車線の割合が閾値 L（例えば 0.6）を超えている場合，つまり，$\exists i \in \{0, 1\} \;\; n_i/(n_0 + n_1) > L$ を満たすとき，その車線に渋滞が生じていると判断し，渋滞が生じていない方の車線を移動先の車線に決定する．前方で渋滞が生じていないと判断した場合，戦略 2 の方法で移動先の車線を決定する．

戦略 2: 車線間のバランス調整

図 3(b) に示すように，各車線の車両流入量に注目して，それらの車両が各通過車線に均等に割り振られるように自車両の移動先の車線を決定する．まず，自車両より後方（通信可能範囲内まで）の車両の走行情報から各車線の車両台数を推定する．自車両より後方で車線 i を走行している車両台数を m_i とし，車両台数の合計を $M = \sum_{i \in \{0,1,2\}} m_i$ とする．後方の車両を 2 つの通過車線に均等に割り振るならば，一通過車線あたりの理想の通過台数は $M/2$ になる．次に，一通過車線あたりの理想の通過台数と各通過車線の走行台数との差分をとることで，その車線へ移動するべき車両台数を求める．車線 0 へ移動するべき車両台数は $M/2 - m_0$，車線 1 へ移動するべき車両台数は $M/2 - m_1$ となる．車線 2 から車線 0 へ移動するには必ず車線 1 をまたがなければならないため，代わりに車線 1 を走行している車両を車線 0 へ移動させる．したがって，車線 1 から車線 0 へ車線変更をする確率 $P_{1\to0}$，そのまま直進する確率 $P_{1\to1}$ は以下のように与えられる．

$$P_{1\to0} = \frac{M/2 - m_0}{m_1} \tag{1}$$

$$P_{1\to1} = 1 - P_{1\to0} = \frac{M/2 - m_2}{m_1} \tag{2}$$

4. 車々間通信機能の普及率の影響評価

提案手法では，車両は車々間通信機能を搭載していることを想定しているが，実環境においては非通信車両が混在することも当然起こりうる．車々間通信を用いた協調型車線変更制御において，多少の非通信車両が混在したとしても十分な性能が維持されることが望ましいため，本章では，車々間通信機能の普及率が提案手法の性能に与える影響を調査する．

4.1 非通信車両が混在することの問題点

提案手法は障害物と車両間の距離に応じた単純なルールベースによって協調制御を実現しているが，車々間通信によって障害物の存在や制御ルールを知ることができない非通信車両が混在してしまうと，提案手法の効果が低下することが危惧される．例えば，提案手法では障害物より少し離れた地点（回避領域に進入した地点）から封鎖車線の車両は車線変更を試みるため，障害物付近にて非通信車両が車線変更を試みる際に，その車線変更先の通過車線は既に車線変更を完了した通信車両によって満たされて，非通信車両は車線変更を完了できずに封鎖車線に置き去りにされることが予想される．また，提案手法では車々間通信によって各車線の車両台数を推定して，その台数に応じて移動先の車線を決定していたが，この方法では非通信車両をカウントすることができないため，非通信車両が多く混在していれば，提案手法における混雑車線の回避と車線間のバランス調整が機能しなくなることが予想される．そのため，車々間通信機能の普及率が提案手法の性能に与える影

© 2021 Information Processing Society of Japan

表 1: シミュレーションパラメータ

Item	Value
Simulation Time	360 sec.
Time Step	0.05 sec.
d_{avoid}	200 m
d_{prelim}	100 m
d_{decel}	500 m
a_{comfort}	1.47 m/s^2
Broadcast interval	0.2 sec.
Sensor Range	100 m
Communication Range	300 m
V2V-equipped Vehicles Ratio	0.0–1.0
Vehicle Length	4.47 m
Vehicle Width	1.795 m
Min. Inter-vehiclur Distance	2.5 m
Regular Inter-vehicular Gap (τ)	2.0 sec.
Gap Open Ratio	2.0
Lane Change Duration	3.0 sec.
LC2013 Lane Change Mode	1617
Initial Speed	11.1 m/s
Road Speed Limit	17.7 m/s
Max. Acceleration	2.6 m/s^2
Max. Deceleration	4.5 m/s^2

響を調査する必要がある．

4.2 シミュレーションモデル

交通流シミュレータ SUMO（Simulation of Urban Mobility） 1.6.0 [4] を用いたミクロシミュレーションを行い，車々間通信機能の普及率が提案手法の性能に与える影響を調査した．ここでは，SUMO の制御用インターフェースである TraCI（Traffic Control Interface）[11] を用いることで，Python プログラムから SUMO 上で実行中のシミュレーションにアクセスして車両を操作している．

4.2.1 環境設定

図 4 に示すような，片側 3 車線の直線道路上に障害物が生じた状況を想定した．道路の長さは 1 km で，始点から 950 m 地点に障害物として一台の車両を停止させた．車両はポアソン到着モデルに従って道路に流入し，出発する車線はランダムに選ばれる．車両は初期速度 11.1 m/s で出発し，制限速度 17.7 m/s で走行する．車々間通信に用いる無線通信規格は IEEE802.11p [12] を想定し，通信可能範囲を 300 m とする．車両は自車両の走行情報（位置，速度など）を含むメッセージを頻繁にブロードキャストしていることを想定しているため，通信可能範囲内の車両の走行情報（位置，速度など）は把握できる．提案手法における各車線の車両台数の推定はこの通信可能範囲内の車両を対象とする．車両に搭載されているセンサの検知可能範囲を 100 m とし，自車両と障害物の間に他の車両が存在しなければ障害物を発見することができる．障害物を発見した車両は，障害物を超えるまで障害物発見通知を 0.2 s 間隔でブロードキャストする．

本稿のシミュレーションでは通信部分を単純化しており，送信した障害物発見通知はマルチホップの通信により後方 1 km 以内の全ての車両に即座に届くものとした．障害物発見通知には障害物の位置，車線情報のみ含まれており，通知を受け取った車両は障害物と自車両の位置に応じた動作をする．各パラメータの値を表 1 に示す．ここで，d_{avoid} と d_{prelim} は，中央車線の車両が予備回避領域に入ったときに障害物周辺の車両台数を把握するために，予備回避領域と回避領域の総距離が通信可能範囲に収まり，かつ，封鎖車線の車両が車線変更を完了するのに十分な距離になるように決定した．

4.2.2 車両の挙動モデル

車両は全て乗用車で，SUMO のデフォルトの追従走行モデル（Krauß）[13] に従って走行する．また，車両は SUMO のデフォルトの車線変更モデル（LC2013）[14] に従って車線変更をする．このモデルは，以下の 4 つの動機によって車線変更を決定する．

(1) 戦略的車線変更　目的地にたどり着くための車線変更（例: 左折するために左車線へ移動）

(2) 協調的車線変更　他車両の車線変更を補助するための車線変更（例: 合流地点において，合流車両を受け入れるためのスペースを空けるためにする車線変更）

(3) 戦術的車線変更　早く移動するための車線変更（例: 追い越し）

(4) 規制遵守車線変更　規制や法律を守るための車線変更（例: 追い越し車線上での継続した走行をやめるためにする車線変更）

LC2013 では車線変更モードを変更することで，各動機の設定を調整できる．車両は通常走行時においては，車線変更モードを 1617 にして走行する．これは，戦略的車線変更，戦術的車線変更，規制遵守車線変更，衝突回避と安全車間距離維持の制御をするモードである．ただし，通信車両は協調範囲内においては，提案手法が意図しない車線変更を抑制するために車線変更モードを 512 にする．これは，衝突回避と安全車間距離維持の制御のみをするモードで，車線変更の 4 つの動機は全て無効化されている．なお，このときの車線変更の制御は，SUMO がもつ車線変更実施のコマンド（changeLane）を利用した．このコマンドに与えたパラメータの車線変更の所要時間を 3.0 s とした．また，車間距離調整領域における加速度の調整は，SUMO がもつ車頭時間調整のコマンド（openGap）を利用した．このコマンドに与えたパラメータの目標車頭時間を 2τ，車頭時間増加の所要時間を $v/(x_{\mathrm{avoid}} - x)$（予備回避領域がある場合は $v/(x_{\mathrm{prelim}} - x)$），最小加速度を a_{comfort} とした．

筆者らは [3] において，非通信車両の挙動を簡易化していた．ここでは，車線変更モードを 512 にすることで基本

© 2021 Information Processing Society of Japan

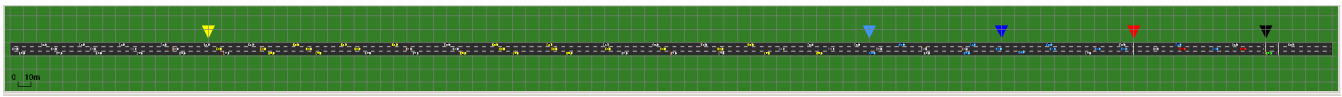


図 4: SUMO を用いたシミュレーションの様子

的に直進しかしないようにし，障害物を直接検知した場合のみ車線変更を試みるようにしていた．非通信車両，つまり手動運転車両なのに機械的に直進しかしないのは不自然なので，本稿では，車線変更モードを 1617 にすることで自然な挙動をするようにした（ただし，障害物を検知した場合のみ車線変更モードを 512 にして，changeLane コマンドによって車線変更制御をする）．しかしながら，手動運転車両は運転者によって様々な挙動が想定されるため，全ての手動運転車両の挙動モデルを同一のものとするのは好ましくない．そこで，非通信車両の挙動モデルとして以下の 3 つを用意した．

(a) 利己的に振舞う車両　自車両が速く走行するための車線変更を積極的に行い，車線変更を受け入れるための速度調整を一切行わない．これらは，LC2013 のパラメータである lcSpeedGain を 1.0 に，lcCooperativeSpeed を 0.0 にすることで実装している．

(b) 利他的に振舞う車両　車線変更を受け入れるための速度調整を積極的に行い，自車両が速く走行するための車線変更は行わない．これらは，lcCooperativeSpeed を 1.0 に，lcSpeedGain を 0.0 にすることで実装している．

(c) 理想的に振舞う車両　車線変更を受け入れるための速度調整も自車両が速く走行するための車線変更も行う．これらは，lcCooperativeSpeed を 1.0 に，lcSpeedGain を 1.0 にすることで実装している．

これら 3 つの挙動モデルは同確率で選ばれる．

4.2.3　評価指標

交通量，公平性，乗り心地の 3 つの観点から提案手法の効果を評価するため，以下のように評価指標を定める．

(i) 交通量　一秒あたりの車両通過量で評価する．これは，終点に到着した車両の合計台数をシミュレーション時間で割った値である．つまり，終点に到着した車両の合計台数を N，シミュレーション終了時刻を t_{end}，最初に車両が終点に到着した時刻を $t_{\mathrm{firstArrival}}$ とすると，一秒あたりの車両通過量 T_{passed} は以下のように与えられる．

$$T_{\mathrm{passed}} = \frac{N}{t_{\mathrm{end}} - t_{\mathrm{firstArrival}}} \tag{3}$$

(ii) 公平性　各車線における通過機会を比較して評価する．障害物地点を通過した車両台数の合計のうち，車線 i から出発していた車両台数が占める割合を，その車線の通過比率と呼ぶことにする．つまり，車線 i から出発して終点に到着した車両台数を n_i，終点に到着した車両の合計台数を $N\left(=\sum_{i\in\{0,1,2\}} n_i\right)$ とすると，車線 i の通過比率 R_i は以下のように与えられる．

$$R_i = \frac{n_i}{N} \quad i \in \{0,1,2\} \tag{4}$$

例えば，障害物がない走行環境で，3 車線にそれぞれ均等に車両が流入し，そのまま道路を渡りきれば，全ての車線の通過比率は 1/3 となる．また，車線 0 に障害物があり，その車線から流入した車両の全てが障害物によって先に進めなかった場合，車線 0 の通過比率 R_0 は 0 となる．このとき，車線 1 と車線 2 に流入した車両が車線 0 に移動することなく障害物の先まで通過したならば，これらの車線の通過比率 R_1，R_2 は 1/2 となる．各車線の通過比率の差が小さいほど，全ての車線に通過機会が平等に与えられているため，車線間の公平性は良いと言える．反対に，各車線の通過比率の差が大きいほど，一部の車線の交通が犠牲になるため，車線間の公平性は悪いと言える．

(iii) 乗り心地　一台あたりの始点から終点までに経験した不快度で評価する．これは，加速度とジャーク（加速度の変化率）を用いて推定した不快度の累積値であり，以下の操作で算出する．

Wang らは [15] において，自動車の走行で生じる速度変動による乗客の乗り心地は加速度とジャークの両方に依存することを指摘し，加速度とジャークに基づく乗り心地の推定指標，不快度を導出している．時刻 t における不快度 $d(t)$ は以下の式で与えられる．

$$\begin{aligned} d(t) \;=\; & 0.19\, a_{p+}(t) + 0.53\, a_{p-}(t) \\ & + 0.27\, j_{r+}(t) + 0.34\, j_{r-}(t) \end{aligned} \tag{5}$$

$a_{p+}(t)$ は時刻 t の直前 3 秒間の加速度の正のピーク値，$a_{p-}(t)$ は時刻 t の直前 3 秒間の加速度の負のピーク値の絶対値，$j_{r+}(t)$ は時刻 t の直前 3 秒間のジャークの平均が正のときの実効値，$j_{r-}(t)$ は時刻 t の直前 3 秒間のジャークの平均が負のときの実効値を表す．各項の係数の組み合わせは，乗客が休憩姿勢の場合と読書姿勢の場合の 2 パターン導出されているが，本稿では読書姿勢の場合の組み合わせを用いる．Wang らは，$d(t) \geq 2$ を不快と定義している．

終点に到着した車両は以上の式で不快度 $d(t)$ を計算し，これを出発時刻から到着時刻まで数値積分し，求まる値をその車両が始点から終点までに経験した不快度とする．ただし，乗客が不快と感じた（$d(t) \geq 2$）場合に着目したいため，この数値積分において $d(t) < 2$

© 2021 Information Processing Society of Japan

の場合は無視するものとした．

4.3 シミュレーション結果

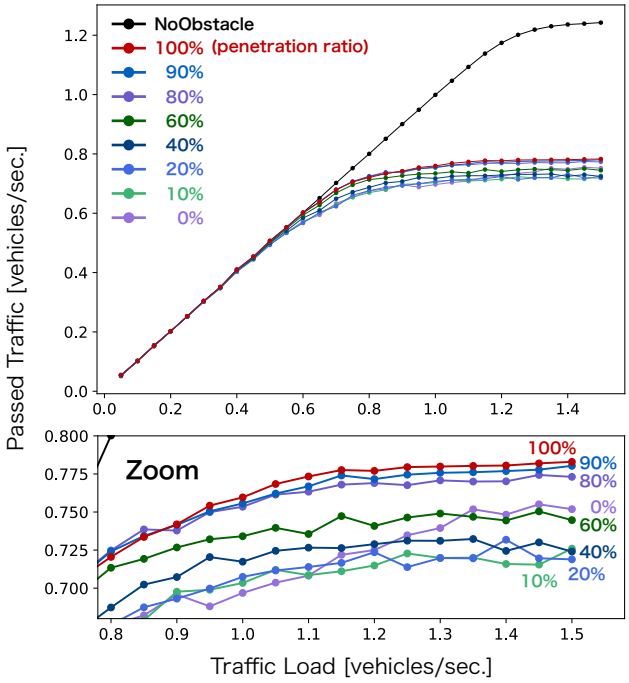
3 車線道路のうち，中央車線が封鎖された場合をシナリオ C（Center），末端車線（右端）が封鎖された場合をシナリオ E（Edge）とする（封鎖された車線が右端と左端とでは実際には異なるが，類似した結果となることが予想されるため，本稿では左端は省略する）．この 2 つのシナリオに対してそれぞれシード値を変えて 40 回シミュレーションを実施し，各指標の評価値の平均を基に評価した．また，通常の交通流の目安として，障害物が存在しないシナリオのモデル（NoObstacle）を用意した．

シミュレーションの結果を図 5–8 に示す．これらの図中の 100%–0%は車々間通信機能の普及率を示している．両シナリオにおいて，総車両通過量は普及率が低下するにつれて徐々に低下するものの，大幅に低下することはなく，普及率が 80%以上ならば影響は十分小さいことが確認できた．車線間の公平性は普及率が 0%のときに大幅に悪化したが，普及率が 10%以上ならば大幅な悪化は防止でき，提案手法を用いない場合に対する優位性を継続できることが確認できた．乗り心地は普及率が低下するにつれて段々と悪化したが，普及率が 60%以上ならば提案手法を使用しない場合に対して乗り心地の悪化抑止の効果が得られることが確認できた．以下で，各指標に着目して議論する．

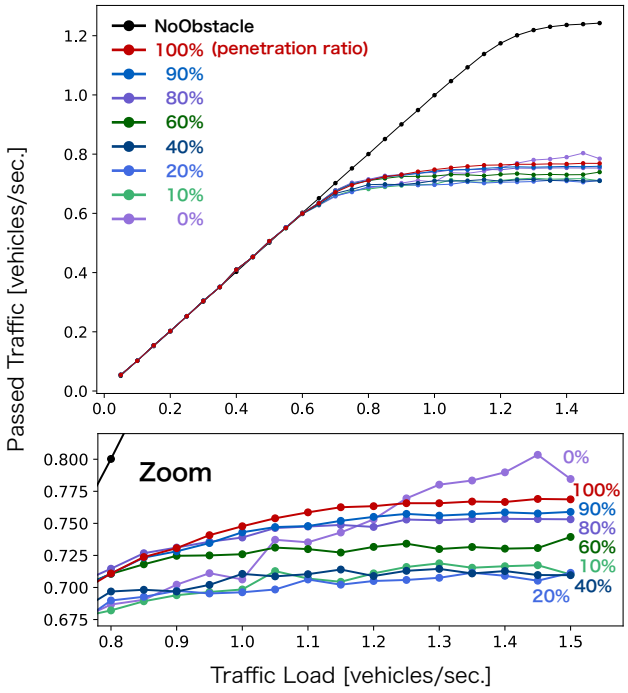
(i) 交通量

図 5(a) にシナリオ E，図 5(b) にシナリオ C での交通量の評価結果を示す．横軸は車両流入量（一秒あたりに始点から出発する車両台数の設定値）で，縦軸は総車両通過量（終点に到着した車両台数の一秒あたりの値）を表している．E，C の両シナリオにおいて，車々間通信機能の普及率が低下するにつれて徐々に総車両通過量は低下している．これは，車頭時間の調整を行わない車両が多くなるにつれて，封鎖車線の車両は障害物地点にたどり着くまでに車線変更を完了しづらくなり，障害物を中心とした渋滞の発生頻度が高くなるためだと考えられる．また，非通信車両が多くなるにつれて，車々間通信による車両台数の推定が正常に機能しなくなることで，提案手法における混雑車線の回避や車線間のバランス調整の効果が薄まってしまうことも原因の一つだと考えられる．

一方，非通信車両のみ（普及率が 0%）の場合においては，非通信車両が多くなったにも関わらず，総車両通過量は増加している．この理由は以下のように考えられる．車頭時間の調整をする車両がいないことで，封鎖車線の車両は車線変更を完了しづらくなるため，封鎖車線における通過機会が減少してしまう．この結果，封鎖車線から出発した車両の通過量は低下し，その代わりに通過車線から出発した車両の通過量は増大するため，少数の通信車両が混在するよりも総車両通過量は大きくなったものと考えられる．これは，車線間の公平性を犠牲にすることで総車両通過量を大きくしているため，良い状況とは言えない．



（a）シナリオ E (Edge-lane closed)

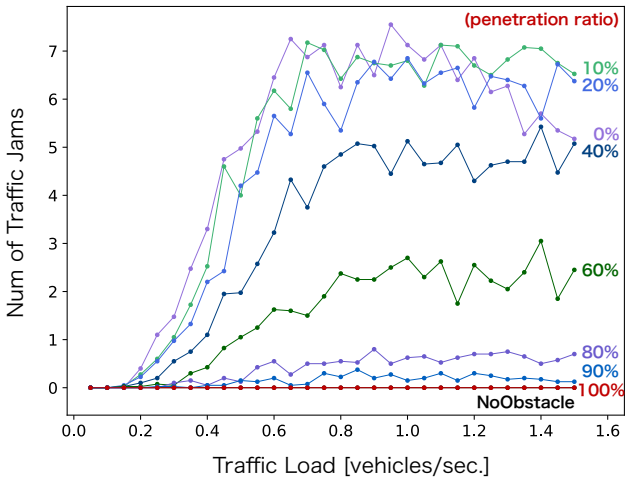


（b）シナリオ C (Center-lane closed)

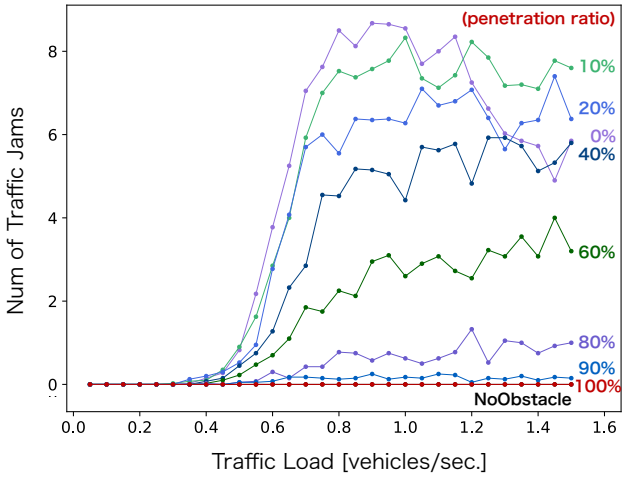
図 5: 交通量

E，C の両シナリオにおいて，非通信車両が混在することによって大幅に総車両通過量が低下することはなく，最大でも 8%程度の低下に収まっている．特に，普及率が 80%以上ならば，非通信車両の混在が提案手法に及ぼす影響は十分小さくなっている．これは，20%までの非通信車両の

© 2021 Information Processing Society of Japan



(a) シナリオ E (Edge-lane closed)



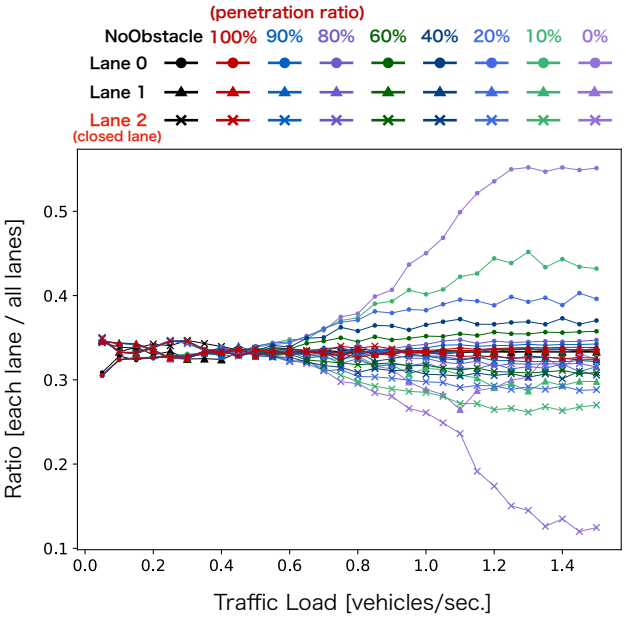
(b) シナリオ C (Center-lane closed)

図 6: 車両が障害物直前で停止した回数

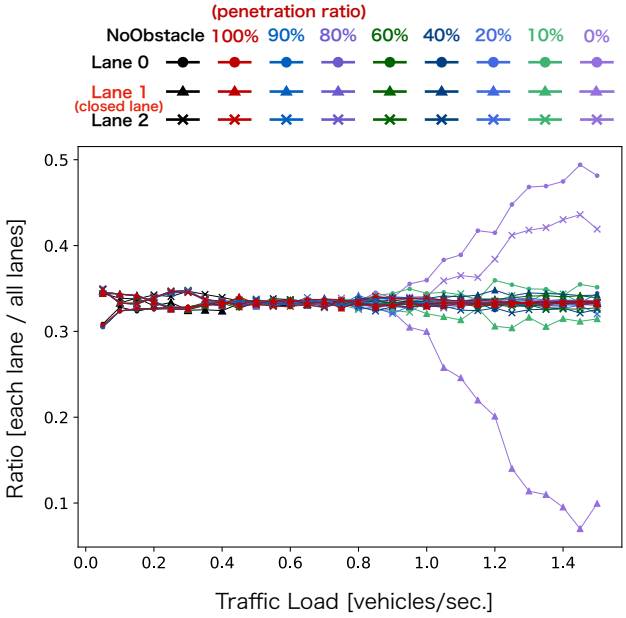
混在ならば，非通信車両の車線変更未完了による渋滞はほとんど生じず，円滑に障害物回避ができているためだと考えられる．そこで，封鎖車線における車線変更未完了によって車両が障害物直前で停止した回数を調査した．ここでは，封鎖車線において車両の障害物までの距離 d が $d < 4.0$ (m) となった場合を障害物直前で停止した回数として（一車両につき一回まで）カウントした．図 6(a) にシナリオ E，図 6(b) にシナリオ C での車両が障害物直前で停止した回数の評価結果を示す．これより，E，C の両シナリオにおいて，普及率が 100–80%の場合は封鎖車線における車線変更未完了による渋滞がほとんど生じていないことがわかる．

(ii) 公平性

図 7(a) にシナリオ E，図 7(b) にシナリオ C での公平性の評価結果を示す．横軸は車両流入量（一秒あたりに始点から出発する車両台数の設定値）で，縦軸は車線 i の通過比率 R_i を表している．車線間の通過比率の差が小さいほど公平性が高く，差が大きいほど公平が低いことを意味している．シナリオ E において，車々間通信機能の普及率が低下するにつれて，封鎖車線の通過比率 R_2 は減少し，一方で障害物から最も離れた車線の通過比率 R_0 は増加することで，車線間の公平性が徐々に悪化している．これは以下のように説明できる．非通信車両が多くなると車頭時間の調整をする車両が少なくなる．従って，封鎖車線の車両は車線変更を完了しづらくなり，図 6 からもわかるように障害物を中心とした渋滞が生じやすくなる．この渋滞は主に封鎖車線と中央車線の交通に影響を及ぼすため，障害物から最も離れた車線だけ通過比率が増加しているものと考えられる．



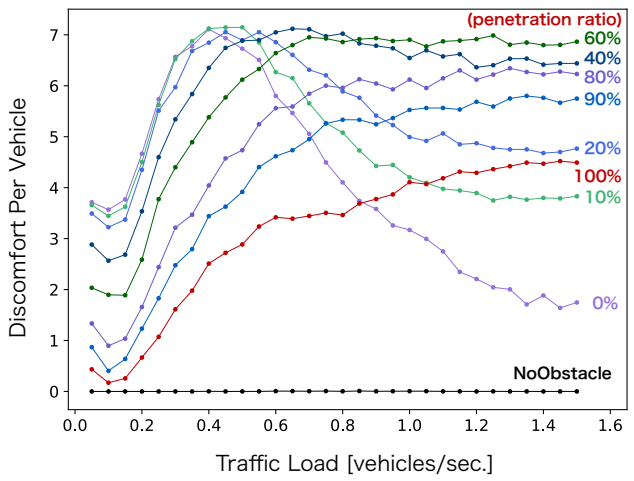
(a) シナリオ E (Edge-lane closed)



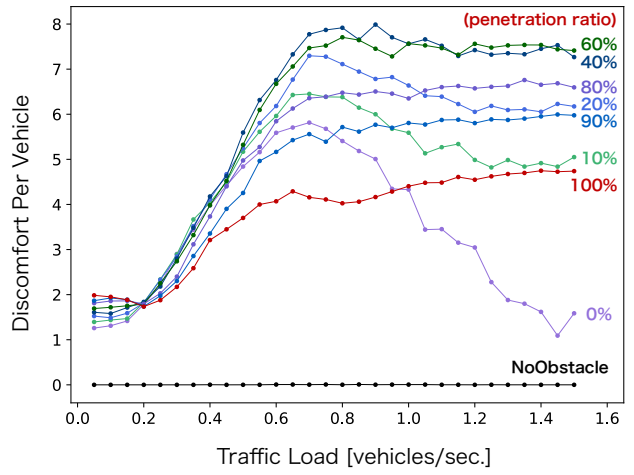
(b) シナリオ C (Center-lane closed)

図 7: 公平性

© 2021 Information Processing Society of Japan



(a) シナリオ E (Edge-lane closed)



(b) シナリオ C (Center-lane closed)

図 8: 乗り心地

E，C の両シナリオにおいて，非通信車両が混在することによって大幅に公平性が悪化することはなかった．特に，シナリオ C においては普及率が 10%であっても十分に公平性を保っている．ただし，非通信車両のみ（普及率が 0%）の場合には，車両流入量が増えるにつれて，封鎖車線の通過比率だけが著しく減少している．これは，封鎖車線と通過車線との速度差が大きすぎると，通過車線の車両が車線変更を受け入れることができずに素通りしてしまうことが多くなってしまい，封鎖車線の完全停止を招いてしまっているためだと考えられる．ここに通信車両が 1 割でも混在していれば，封鎖車線の車両を受け入れるための挙動（車頭時間の調整）をして，それを機に封鎖車線の車両が動き出すことができるため，封鎖車線走行車両の停止を防止できているものと考えられる．

(iii) 乗り心地

図 8(a) にシナリオ E，図 8(b) にシナリオ C での乗り心地の評価結果を示す．横軸は車両流入量（一秒あたりに始点から出発する車両台数の設定値）で，縦軸は一台あたりの経験した不快度（始点から終点までに経験した不快度の累積値）を表している．E，C の両シナリオにおいて，非通信車両が多く混在する場合（普及率が 60–0%の場合）は，車両流入量が 0.2–0.8 のときに普及率 100%の場合と比べて不快度が大きくなってしまうことがある．対して，普及率が 100%（提案手法）の場合は，車両流入量が変化しても不快度が極端に大きくなることはなく，一定の水準に抑えることができている．これは，提案手法では全ての車両が車頭時間の調整をすることで，車線変更を受け入れる際の減速が少なくなり，乗り心地の悪化を防いでいるためだと考えられる．この提案手法の効果は非通信車両が多くなるにつれて段々と薄まっていき，普及率が 60%を下回るとほとんど効果は見られなくなっている．この理由は以下のように考えられる．非通信車両は事前に車頭時間の調整を行わないため，非通信車両が車両を受け入れる際には十分な車間距離が確保できていないことがある．この結果，後続車両の減速が生じやすくなってしまう．また，非通信車両は車頭時間の調整のための減速をしないため，非通信車両が車線変更をする際には受け入れ側の通信車両と速度差ができており，非通信車両による減速が生じやすくなってしまう．このように，非通信車両が関わる車線変更・受け入れの際には乗り心地を悪化させるような減速が生じやすくなるため，提案手法の効果は非通信車両が多くなるにつれて段々と薄まっていくものと考えられる．

また，普及率が 40%を下回ると，車両流入量が大きい場合（0.6 以上）に不快度は段々と小さくなっている．これは，慢性的な渋滞によって加速度の変化自体の回数が少なくなっていることに起因するものであるため，良い状況とは言えない．

(iv) まとめ

各評価指標で共通して，車々間通信機能の普及率が低下するにつれて提案手法による効果は徐々になくなっていった．封鎖車線の車両の車線変更未完了による渋滞の発生を防止して車両通過量を増加させる効果を得るには，普及率は 80%以上必要である．各車線の通過比率の差を小さくして車線間の公平性を向上させる効果を得るには，普及率は 10%以上必要である．車頭時間の調整により円滑な車線変更を促すことで乗客の乗り心地の悪化を防ぐ効果を得るには，普及率は 60%以上必要である．

5. 非通信車両の混在時の性能低下の抑制方法

前章より，提案手法における交通量と乗り心地の効果は非通信車両の混在に対する耐性が低いことがわかった．これは，非通信車両が関わる車線変更・受け入れの際に急激な加減速が生じやすいことが原因だと考えられる．また，車々間通信によって非通信車両を把握できないことにより，提案手法における各車線の車両台数の推定が正常に機能しなくなり，各車線の車両台数に基づく移動先の車線決

© 2021 Information Processing Society of Japan

定の効果が薄まってしまうことも原因だと考えられる．本章では，これらの原因を緩和するための提案手法の改善案を示す．ここでは，(1)Collective Perception を用いた非通信車両の把握，(2) 車々間通信機能の普及率の推定値に応じた車頭時間調整倍率の変更の 2 つの方法を提案する．

5.1 Collective Perception を用いた非通信車両の把握

欧州では，路車間，車々間通信を介したセンサ情報の交換によって，車両による周辺の交通状況把握を補助する技術である Collective Perception の標準化が進められている [8]．Collective Perception を用いることで，通信車両は自身のセンサで検知している物体の存在を他通信車両と共有することができる．すなわち，通信車両らは通信車両に検知されている非通信車両の存在を車々間通信によって把握することができる．非通信車両を把握することができれば，提案手法における各車線の車両台数の推定の精度が向上する．そのため，非通信車両が多く混在したとしても，提案手法における各車線の車両台数に基づく移動先の車線決定の効果持続が見込まれる．

5.2 車々間通信機能の普及率の推定値に応じた車頭時間調整倍率の変更

提案手法では，障害物より離れた地点で車頭時間の調整をしている．シミュレーションにおいて，車両流入量が大きい場合には，車頭時間を調整するための減速が伝搬され，障害物より離れた地点で軽い渋滞が生じる．これは見方を変えれば，障害物地点で車線変更を円滑に行えるだけのスペースの余裕を作るために，障害物より離れた地点で交通流を調整しているとも言える．非通信車両が多く混在した場合，車頭時間を調整する車両が減ってしまい，障害物地点で車線変更を円滑に行えるだけのスペースの余裕を作ることができていないため，乗り心地が悪化していると考えられる．そこで，車々間通信機能の普及率を推定し，それに応じて通信車両の車頭時間調整倍率を変化させることで，非通信車両が多く混在したとしても，通信車両のみの場合と同じだけスペースの余裕が持てるように交通流を調整する．

車間距離調整領域に入った通信車両は，以下の手順で車々間通信機能の普及率を推定し，それに応じて車頭時間調整倍率を決定する．まず，車々間通信機能の普及率の推定方法について述べる．Collective Perception を用いることで，通信車両らは通信車両に検知されている車両の存在を車々間通信によって把握することができる．このときに，通信車両はセンサで検知している車両に対して，その車両と通信することができているかどうかを調べることで，通信車両なのか，非通信車両なのかを判別することができるだろう．この非通信車両か否かの情報もブロードキャストメッセージに付与することで，通信車両らは把握している周辺車両のうち，通信車両の台数，非通信車両の台数をそれぞれ把握することができる．つまり，通信車両はセンサ，車々間通信によって把握している周辺車両のうち，通信車両が占める割合を算出することで車々間通信機能の普及率を推定することができる．

推定した車々間通信機能の普及率を基に，車頭時間の平均が通信車両のみの場合と同じになるように車頭時間調整倍率を算出する．障害物上流を走行している車両のうち，通信車両の占める割合（普及率）を $p_{\mathrm{connected}}$ とすると，非通信車両の占める割合は $1.0 - p_{\mathrm{connected}}$ となる．通信車両のみの場合，全ての車両が車頭時間 τ を 2.0 倍にするため，車頭時間の平均は 2.0τ になる．非通信車両と通信車両が混在した場合に車頭時間の平均を 2.0τ にするには，通信車両の車頭時間調整倍率を x とおくと，以下の式になる．

$$2.0\tau = x \cdot \tau \cdot p_{\mathrm{connected}} + \tau \cdot (1.0 - p_{\mathrm{connected}}) \qquad (6)$$

この式を x について解くと，通信車両の車頭時間調整倍率 x は以下のようになる．

$$x = \frac{1.0 + p_{\mathrm{connected}}}{p_{\mathrm{connected}}} \qquad (7)$$

ただし，式 7 は $p_{\mathrm{connected}}$ が 0.0 に近づくにつれて x は無限に発散するため，$p_{\mathrm{connected}} = 0.5$ のときの $x = 3.0$ を上限として設定する．

車々間通信機能の普及率に応じて通信車両の車頭時間調整倍率を変更することで，非通信車両が多く混在したとしても，障害物地点で車線変更を円滑に行えるだけのスペースの余裕を確保することができるため，車線変更の際の加速度の変化が小さくなり，乗り心地の悪化を抑止できることが見込まれる．

6. まとめ

筆者らが提案した突発的障害物回避のための協調型車線変更制御手法において，車々間通信機能の普及率が与える影響を調査した．SUMO を用いたシミュレーションにより，総車両通過量は普及率が低下するにつれて徐々に低下するものの，大幅に低下することはなく，普及率が 80%以上ならば影響は十分小さいことが確認できた．車線間の公平性は普及率が 0%のときに大幅に悪化したが，普及率が 10%以上ならば大幅な悪化は防止でき，提案手法を用いない場合に対する優位性を継続できることが確認できた．乗り心地は普及率が低下するにつれて段々と悪化したが，普及率が 60%以上ならば提案手法を使用しない場合に対して乗り心地の悪化抑止の効果が得られることが確認できた．

非通信車両が混在することに対する提案手法における交通量と乗り心地の効果の耐性を向上させるために，Collective Perception を用いた非通信車両の把握，車々間通信機能の普及率の推定値に応じた車頭時間調整倍率の変更を提案した．今後，これらの機能を実装し，性能評価を行う予

© 2021 Information Processing Society of Japan

定である．また，4 車線以上の道路環境，複数車線を封鎖する障害物発生環境におけるシミュレーション評価，及び性能改善を行う予定である．

参考文献

[1] 総務省: Connected Car 社会の実現に向けて, 入手先〈https://www.soumu.go.jp/main_content/000501373.pdf〉(参照 2021-01-19).

[2] 石原進, 山下広仁: 突発的障害物回避のための車々間通信による協調型車線変更制御, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 119, No. 8, pp. 37–41 (2019).

[3] 淺野心夏, 石原進: 多車線道路における突発的障害物回避のための各車線の車両通過量の公平性に配慮した協調型車群制御, 研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS), Vol. 2021–ITS–84, No. 7, pp. 1–8 (2021).

[4] Simulation of Urban Mobility (SUMO), 入手先〈http://sumo.dlr.de/wiki/〉 (参照 2021-01-19).

[5] Y. Ito, M. A. S. Kamal, T. Yoshimura, S. Azuma: Coordination of Connected Vehicles on Merging Roads Using Pseudo-Perturbation-Based Broadcast Control, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 20, No. 9, pp. 3496–3512 (2019).

[6] C2C-CC: Guidance for day 2 and beyond roadmap CAR 2 CAR Communication Consortium, 入手先〈https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2CCC_WP_2072_RoadmapDay2AndBeyond.pdf〉 (参照 2021-02-07).

[7] T. Tiernan, P. Bujanovic, P. Azeredo, W. G. Najm, and T. Lochrane: CARMA Testing and Evaluation of Research Mobility Applications, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2019).

[8] H. Gunther, O. Trauer, and L. Wolf: The Potential of Collective Perception in Vehiclar Ad-hoc Networks, 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), IEEE(2015).

[9] Federal Highway Administration: CARMA Program Overview, 入手先〈https://highways.dot.gov/research/operations/CARMA〉 (参照 2021-05-05).

[10] 石原進: 車々間通信による協調型危険回避における通信信頼性の影響評価, 情報処理学会高度交通システムとスマートコミュニティ研究会, 情報処理学会研究報告, Vol. 2018-ITS-75, No. 20, pp. 1–6 (2018).

[11] A. Wegener, M. Piorkowski, M. Raya, H. Hellbruck, S. Fischer and J. Hubaux: TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators, 11th Communications and Networking Simulation Symposium (CNS), pp. 155–163 (2008).

[12] IEEE Standard Association: IEEE 802.11p-2010 - IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, 入手先〈https://standards.ieee.org/standard/802_11p-2010.html〉 (参照 2020-10-28).

[13] S. Krauß, P. Wagner and C. Gawron: Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow, Physical Review E 55, pp. 5597—5602 (1997).

[14] J.Erdmann: "SUMO's Lane-Changing Model," In: M.Behrisch, M. Weber (eds) Modeling Mobility with Open Data, Lecture Notes in Mobility, Springer (2015).

[15] F. Wang, K. Sagawa and H. Inooka: A study of the relationship between the longitudinal acceleration/deceleration of automobiles and ride comfort, 人間工学, Vol. 36, No. 4, pp. 191–200 (2000).

© 2021 Information Processing Society of Japan