

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

浅野 心夏¹ 石原 進²

概要：車両事故や積載物の落下によって一時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。石原によって、2車線道路における障害物回避のための車々間通信と単純なルールベースの制御に基づく車線変更・受け入れ制御手法が提案され、交通流シミュレータ SUMO を用いたシミュレーションにて有用性が確認された。本稿では、この手法を基に、3車線道路における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手法を提案する。この手法では、各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、障害物の存在しない2つの車線の交通量の負担が均等になるように自車両の移動先の車線の決定を行う。同様のシミュレータを用いて3車線道路におけるシミュレーションを行い、車両総通過量、車線間の公平性、乗り心地の3つの指標を用いて性能を評価した。シミュレーションの結果、提案手法は車線間の公平性と乗り心地を悪化させることなく十分に高い車両交通量を達成できることが確認できた。

キーワード：車々間通信, 車線変更, 協調走行, 障害物回避

Cooperative vehicles control considering the fairness of traffic in each lane to avoid a sudden obstacle on multilane roads

SHINKA ASANO¹ SUSUMU ISHIHARA²

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おり、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が期待されている [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適切な制御をさせることで、安全かつ円滑に障害物を回避可能となるだろう。

石原は [2] において、障害物発見通知を受け取った車両に対し、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、車両が障害物に十分近づくと車線変更を行う戦略を提案した。交通流シミュレータ SUMO [3] を用いた2車線道路におけるシミュレーションにより、車々間通信を行わない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、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させることができた。しかしながら、[2] では、2車線道路における制御までしか達成されていなかった。本稿では、この戦略を基に、3車線道路に適用する戦略を提案する。提案手法では、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各車両の移動先の車線を適切に決定することによって、障害物より上流の交通量を障害物の存在しない2つの車線に

¹ 静岡大学工学部数理システム工学科学士課程

² 静岡大学大学院工学領域

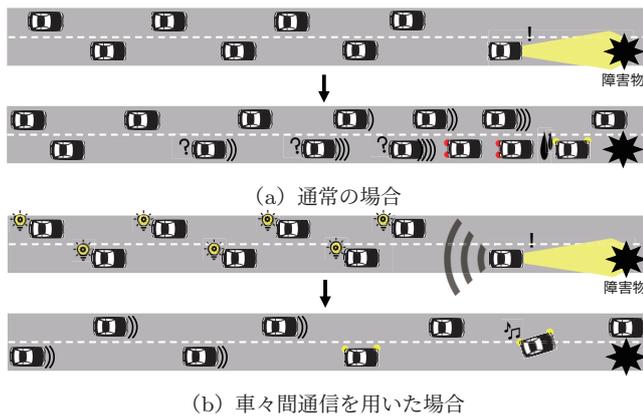


図 1: 車々間通信を用いた障害物回避

均等に分散させる。これにより、一部の車線を混雑させることなく全ての車両が速やかに障害物を通過可能とする。

以下、2章で関連研究について述べ、3章で石原によって提案された手法について説明し、4章で提案手法について説明する。5章でSUMOを用いたシミュレーションにより提案手法を評価する。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 [4] [5] [6]。合流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 [4]。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) を用いて、通信機能の持っていない車両を認識することで、安全な合流を目指している [5]。また、CARMA (Cooperative Automation Research Mobility Applications) 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を交換し、本線車両は速度調整しながら合流を促し、合流車線は加速しながら本線に入ることで円滑な合流を試みており、実証実験が進められている [6]。ここでは、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

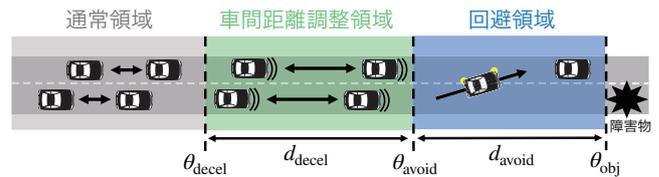


図 2: 障害物と車両間の距離に応じた異なる制御

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。

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、車々間通信を用いて障害物の存在を広範囲に通知し、事前に後続車両に障害物回避のための適切な制御をさせれば、図1のような安全かつ円滑な障害物回避ができると見込まれる。石原は、障害物を検知した車両が車々間通信を用いて障害物検出情報を周辺車両に通知し、その情報を受け取った車両に対して、障害物に近づく前に前方車両との車間距離を通常の倍になるように制御し、障害物に十分近づいたら車線変更をさせる戦略を提案した [2] [7]。SUMOを用いた2車線道路におけるシミュレーションにより、同手法によって車線間の公平性を維持しながら車両通過量を大きくできること、並びに顕著なメッセージ受信の失敗がない限り、メッセージ受信率の影響は小さいことが確認された。本研究はこの手法を基にしているため、次章にて要点を述べる。

3. 車々間通信と単純なルールベースの制御に基づく車線変更・受け入れ制御手法

本章では、石原によって提案された車々間通信と単純なルールベースの制御に基づく車線変更・受け入れ制御手法 (以後、先行手法と呼ぶ) 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。

3.1 想定環境

先行研究、及び本研究では以下の環境を想定している。

- 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。
- 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。

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3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 θ_{obj} と自車両の位置 x （進行方向を正とした軸の座標）に応じて制御を決定する。 $\theta_{avoid} \leq x < \theta_{obj}$ 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。 $\theta_{decel} \leq x < \theta_{avoid}$ 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。 $x < \theta_{decel}$ 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。

3.3 障害物発見通知

車両がカメラ、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、1ホップの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（例えば 0.2 秒毎に）同じメッセージを配信し続ける。

3.4 車線変更の制限

回避領域で封鎖車線を走行している車両は車線変更を試みる。このように車線変更の実施を一定範囲のみに限定するのは、障害物よりも上流で多くの車両が車線変更を行ってしまうと、これらの車両によって通過車線が混雑し、もともと通過車線を走行していた車両よりも、封鎖車線を走行していた車両の方がより多く障害物を通過できる結果になってしまうためである。

3.5 車頭時間の調整

車間距離調整領域を走行している車両は、走行速度 v に照らして自身が $x = \theta_{avoid}$ 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。このように車頭時間を通常の倍にするのは、回避領域に入ったら直ちに車線変更の実施ができるように十分な車間距離を確保するためである。

3.6 課題

3車線以上の道路環境における障害物回避に先行手法を用いた場合、封鎖車線の車両にしか車線変更の制御を与えていないため、交通量は封鎖車線に隣接する通過車線に集中してしまう。一方、障害物から離れた通過車線の車両は

通常通り走行できてしまう。これでは、各通過車線の交通量の負担に差が生じてしまい、不公平である。また、2車線道路における障害物回避では封鎖車線が必ず端の車線だったため、封鎖車線における車線変更先の候補は1つしか無かったが、3車線以上の道路環境における障害物回避では封鎖車線は必ずしも端の車線ではない。したがって、封鎖車線における車線変更先の候補が2つある場合、いずれかを選択する必要がある。

4. 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手法

本章では、3車線道路における障害物回避のために、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手法（以後、**提案手法**と呼ぶ）を提案する。この手法では、各通過車線の交通量の負担が均等になるように各車両の移動先の車線を決定することで、障害物を回避する際に生じる交通流の偏りをなくし、車線間の公平性を向上させることを試みる。3車線道路に1車線を封鎖する障害物が生じた環境を想定すると、中央車線が封鎖される場合と、末端車線が封鎖される場合の2パターンに分けられる。以下、この2パターンにおける戦略をそれぞれ説明する。

4.1 前提

提案手法では、以下のことを前提としている。

- 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。
- 障害物の協調回避制御における車線変更は、障害物から離れる方向へのみ行うものとし、1車線をまたぐ車線変更は行わないものとする。

4.2 目標とする状態

本研究では車両総通過量、車線間の公平性、乗り心地の3つの要件を、バランス良く満たしている状態を目標とする。障害物回避において、単位時間あたりの車両通過量は重要であるが、車両通過量を増やすことだけを目標とすると、一部の車両の通行を犠牲にして通過車線を走行する車両の交通量を最大化する戦略が可能になってしまう。このような戦略では、障害物直前で停止してしまった車両は以後全く動くことができなくなったり、車線によって車両通過量に差が生まれて車線間の公平性が損なわれたりしてしまう。また、安全性と引き換えに最低車間距離を縮めたり、強引に車線変更を行ったりすれば、車両通過量は増大するかもしれないが、急激な加減速によって乗り心地が悪化し、最悪の場合交通事故が生じてしまう。このように、障害物回避の制御手法を考える上では車両通過量を増やすだけでなく、車線間の公平性や乗り心地にも配慮する必要がある。

ここで、本研究における車線間の公平性が高い状態を以下のように定義する。

- (1) 障害物通過地点における2つの通過車線間の単位時間あたりの車両通過量の差が十分小さい。
- (2) 各車線において、その車線の車両の流入量がその道路の総流入量に占める割合と、その車線から出発した車両の通過量がその道路の総通過量に占める割合との差が十分小さい。

また、本研究における乗り心地が良い状態を以下のように定義する。

- (1) 一連の動作において、大きな加減速が少ない
- (2) 一連の動作において、急激な加減速の変化が少ない。つまり、大きなジャーク（加速度の時間微分）の発生が少ない。

4.3 基本戦略

提案手法では、以下の3つを基本戦略とする。

- 障害物周辺で生じる渋滞に敏感に反応するために、自車両より前方の各通過車線の交通量の負担割合を推定し、過度の偏りがあればその車線を避けるようにする。
- 各通過車線の交通量の負担を均等にするために、自車両より後方の各車線の車両密度を推定し、それに応じて適切に各車両の移動先の車線を決定する。
- 封鎖車線の車両が車線変更を行いやすくするために、封鎖車線の車両が車線変更をする前に、通過車線の車両に障害物から離れる方向へ車線変更をさせる。

4.4 中央車線が封鎖された場合の制御

まず、中央車線が封鎖された場合の制御法を説明する。両端の通過車線の車両は障害物を超えるまで直進するしかない。一方、封鎖車線の車両は車線変更をしなければならないが、左右の車線のいずれかを選択することができる。この封鎖車線の車両の移動先の車線を適切に制御することで、障害物より上流の交通量を各通過車線に均等に分散させることを試みる。

4.4.1 基本戦略

各車線の車両密度の推定値に応じて各通過車線の交通量の負担を均等にするように封鎖車線の車両の移動先の車線を決定することを基本戦略とする。図3に中央車線が封鎖された場合における障害物と車両間の距離に応じた異なる制御を示す。各車線の車両流入量が常に均等ならば、封鎖車線の車両は左右どちらを選んでも、車線毎の交通量の負担の比は変わらない。しかしながら、実環境において各車線の車両流入量が常に均等ということはない。そこで、車々間通信によって取得した各車線の車両密度の推定値に応じて移動先の車線を決めることで、車線間の交通量の分布が不均一な場合にも車線間の公平性の悪化を防ぐ。

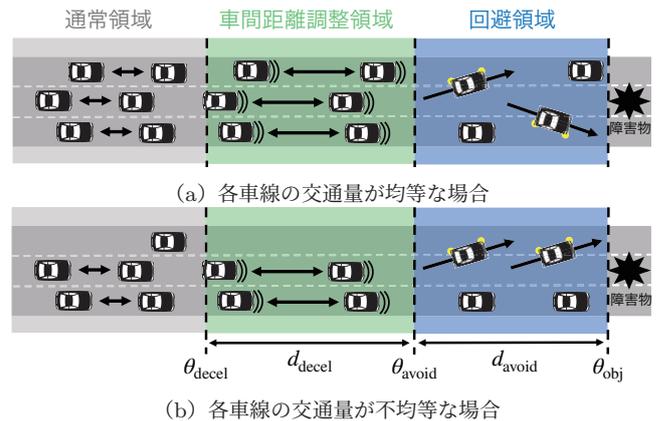


図3: 中央車線が封鎖された場合における障害物の回避

4.5 各車線の車両密度に応じた移動先の車線の決定

中央車線の車両は、回避領域に入ったら、車々間通信によって取得した周辺車両の走行情報から、自車両の通信可能範囲内にいる各車線の車両台数を前方と後方でそれぞれカウントし、以下の手順で移動先の車線を決定する。

まず、前方の各通過車線の交通量の負担割合を推定し、これより障害物周辺に渋滞が生じているかを判断する。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を中央の封鎖車線、車線2を右端の通過車線とする。自車両より前方で車線 i を走行している車両台数を n_{leader_i} とする。2つの通過車線の交通量のうち、どちらかの通過車線の負担割合が閾値 L (例えば0.6) を超えている場合、つまり、 $\exists i \in \{0, 2\} n_{\text{leader}_i} / (n_{\text{leader}_0} + n_{\text{leader}_2}) > L$ を満たすとき、その車線に渋滞が生じていると判断し、交通量の負担が低い方の通過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ら、後方の車両の走行情報から各車線の車両密度を推定し、各通過車線の交通量が均等になるように移動先の車線を決定する。このとき、対象を自車両の後方だけに限定しているのは、前方では既に各車両が車線変更を行っており、正確な各車線の車両流入量を推定するのは難しいためである。自車両より後方で車線 i を走行している車両台数を n_{follower_i} とし、合計を $N_{\text{follower}} (= \sum_{i \in \{0, 1, 2\}} n_{\text{follower}_i})$ 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 $N_{\text{follower}}/2$ になる。この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、その車線へ移動すべき車両台数がわかる。つまり、車線0へ移動すべき車両台数は $N_{\text{follower}}/2 - n_{\text{follower}_0}$ 、車線2へ移動すべき車両台数は $N_{\text{follower}}/2 - n_{\text{follower}_2}$ と求まる。したがって、車線1から車線0へ車線変更をする確率 $P_{1 \rightarrow 0}$ 、車線1から車線2へ車線変更をする確率 $P_{1 \rightarrow 2}$ を以下のように与えられる。

$$P_{1 \rightarrow 0} = \left(\frac{N_{\text{follower}}}{2} - n_{\text{follower}_0} \right) / n_{\text{follower}_1} \quad (1)$$

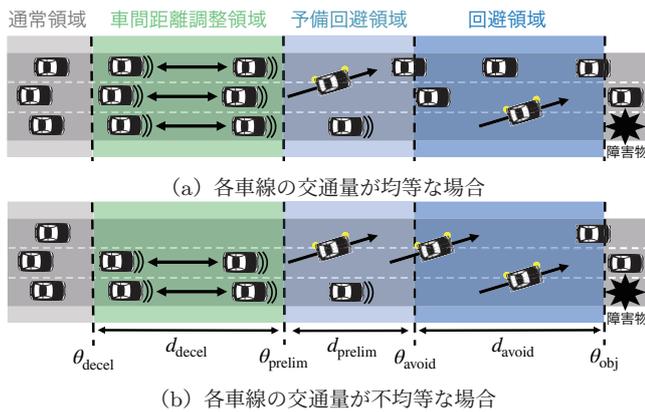


図 4: 末端車線が封鎖された場合における障害物の回避

$$P_{1 \rightarrow 2} = \left(\frac{N_{\text{follower}}}{2} - n_{\text{follower}_2} \right) / n_{\text{follower}_1} \quad (2)$$

4.6 末端車線が封鎖された場合の制御

次に、末端車線が封鎖された場合の制御法を説明する。末端車線が封鎖された場合、封鎖車線の車両は中央車線へ車線変更をするしかないし、反対側の末端車線の車両は障害物を超えるまで直進するしかない。一方、中央車線の車両は直進するか、障害物から離れる方向へ車線変更をするかを選択することができる。この中央車線の車両の移動先の車線を適切に制御することで、障害物より上流の交通量を各通過車線に均等に分散させることを試みる。

4.6.1 基本戦略

封鎖車線の車両が車線変更を行いやすくするために、封鎖車線の車両が回避領域で車線変更をする前に、中央車線の車両に障害物から離れる方向へ車線変更をさせることを基本戦略とする。図 4 に末端車線が封鎖された場合における障害物と車両間の距離に応じた異なる制御を示す。封鎖車線の車両が車線変更をする前に中央車線の車両が車線変更を済ませておけば、中央車線に余裕を持たせることができる。封鎖車線の車両は回避領域で車線変更をすることになっているので、中央車線の車両は回避領域の手前で車線変更すればよい。

そこで、回避領域と車間距離調整領域の間に、中央車線の車両が前もって車線変更を行うための領域を設ける。以下、この領域のことを **予備回避領域** と呼ぶ。この領域で中央車線の車両が車線変更を行うことで、封鎖車線の車両が回避領域に入ったときには中央車線の車両密度が低下しており、障害物回避のための車線変更をより行いやすくなることを見込まれる。また、この中央車線の車線変更の判断を、車々間通信によって取得した各車線の車両密度の推定値に応じて、各通過車線の交通量が均等になるように移動先の車線を決定する。これにより、車線間の公平性が向上することが見込まれる。

4.6.2 各車線の車両密度に応じた移動先の車線の決定

中央車線の車両は、予備回避領域に入ったら、車々間通

信によって取得した周辺車両の走行情報から、自車両の通信可能範囲内にいる各車線の車両台数を前方と後方でそれぞれカウントし、以下の手順で移動先の車線を決定する。

まず、前方の各通過車線の交通量の負担割合を推定し、これより障害物周辺で渋滞が生じているかを判断する。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_{leader_i} とする。2つの通過車線の交通量のうち、封鎖車線に隣接する車線 1 の負担割合が閾値 L (例えば 0.6) を超えている場合、つまり、 $n_{\text{leader}_1} / (n_{\text{leader}_0} + n_{\text{leader}_1}) > L$ を満たすとき、車線 1 に渋滞が生じていると判断し、車線 0 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ら、後方の車両の走行情報から各車線の車両密度を推定し、各通過車線の交通量が均等になるように移動先の車線を決定する。このとき、対象を自車両の後方だけに限定しているのは、前方では既に各車両が車線変更を行っており、正確な各車線の車両流入量を推定するのは難しいためである。自車両より後方で車線 i を走行している車両台数を n_{follower_i} とし、合計を $N_{\text{follower}} (= \sum_{i \in \{0, 1, 2\}} n_{\text{follower}_i})$ 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 $N_{\text{follower}}/2$ になる。この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、その車線へ移動すべき車両台数がわかる。つまり、車線 0 へ移動すべき車両台数は $N_{\text{follower}}/2 - n_{\text{follower}_0}$ 、車線 1 へ移動すべき車両台数は $N_{\text{follower}}/2 - n_{\text{follower}_1}$ と求まる。

封鎖車線の車両を各車線へ移動できれば良いのだが、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。そこで、 n_{follower_2} 台のうち車線 0 へ移動すべき車両台数分、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 $P_{1 \rightarrow 0}$ は以下のように与えられる。

$$P_{1 \rightarrow 0} = \left(\frac{N_{\text{follower}}}{2} - n_{\text{follower}_0} \right) / n_{\text{follower}_1} \quad (3)$$

ただし、予備回避領域で中央車線の車両が車線変更を試みて、試行時間 T_{try} を過ぎても達成できない場合は車線変更を諦めるようにする。これは、回避領域における車線変更は達成しないと障害物を通過することができないのに対して、予備回避領域における車線変更は達成できなくともその車両は障害物を通過することはできるので、必ずしも車線変更を達成する必要はないためである。

5. シミュレーション評価

提案手法の効果を確認するため、交通流シミュレータ SUMO(Simulation of Urban Mobility) 1.6.0 [3] を用いたマイクロシミュレーションを行った。SUMO の制御用イン

ターフェースである TraCI(Traffic Control Interface) [8]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。

5.1 環境設定

図 5 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 1km で、始点から 950m 地点に障害物として一台の車両を停止させた。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) [9] に従って走行する。なお、本評価では各車線における出発台数と到着台数に着目したいため、車両は通常運転時には原則として車線変更を行わないものとした。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。車両に搭載されている無線通信機器の通信可能範囲は 300 m で、この範囲内の車両の走行情報は把握することができる。車両に搭載されているセンサの検知可能範囲は 100 m で、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、障害物を越えるまで障害物発見通知を 0.2s 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、送信した通知は後方 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るように、かつ、封鎖車線の車両が車線変更を達成するのに十分な距離になるように決定した。図 6 に示すように、中央車線が封鎖された場合をシナリオ C (Center)、

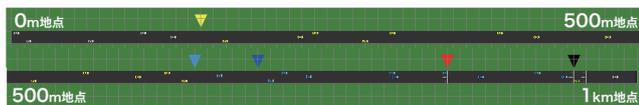


図 5: SUMO を用いたシミュレーションの様子

表 1: シミュレーションパラメータ

Item	Value	Item	Value
Simulation Time	720 sec.	Gap Open Ratio	2.0
Time Step	0.05 sec.	Communicable Range	300 m
T_{notify}	0.2 sec.	Vehicle Length	4.47 m
T_{try}	10.0 sec.	Min. Vehicle Gap	2.5 m
$a_{comfort}$	1.47 m/s ²	Regular Inter-vehicular Gap	2.0 sec.
$d_{perceive}$	100 m	Initial Speed	11.1 m/s
d_{avoid}	250 m	Road Speed Limit	17.7 m/s
d_{prelim}	50 m	Max. Acceleration	2.6 m/s ²
d_{decel}	500 m	Max. Deceleration	4.5 m/s ²
L	0.6		



図 6: シミュレーションシナリオ

表 2: 各モデルの機能

モデル名	障害物発見通知	車頭時間の調整	車両密度に基づく移動先の車線決定
Proposed_Full	あり	あり	あり
Proposed_Random	あり	あり	なし (ランダム)
Proposed_NoGapOpen	あり	なし	あり
Manual	なし	なし	なし
NoObstacle	障害物なし		

末端車線が封鎖された場合をシナリオ E (Edge) とする。

5.2 比較モデル

提案手法との比較のために、提案手法を含む 4 つのモデル (Proposed_Full, Proposed_Random, Proposed_NoGapOpen, Manual) を用意した。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。各モデルの機能を表 2 に示し、概要を以下に示す。

Proposed_Full 提案手法のモデル。

Proposed_Random 提案手法の移動先の車線の決定を単純化したモデル。各車両は通過車線における移動先の車線の決定、及び封鎖車線における移動先の車線の決定はランダムに行う。

Proposed_NoGapOpen 提案手法の車頭時間調整機能を無くしたモデル。各車両は車間距離調整領域で車頭時間を調整するための速度制御を行わない。

Manual 車々間通信を行わないモデル。各車両は障害物を直接検知した場合のみ障害物回避のための車線変更を行う。このときの封鎖車線の車両における移動先の車線の決定はランダムに行う。

NoObstacle 障害物が存在しないモデル。

5.3 評価指標

車両総通過量、車線間の公平性、乗り心地の 3 つの観点から各手法の効果を評価するため、以下のような評価指標を定める。

車両総通過量 一秒あたりの終点に到着した車両台数で評価する。これは、シミュレーション終了時刻と最初に車両が終点に到着した時刻の差分で車両の総通過台数を割った値である。

車線間の公平性 各車線の車両通過量が車両総通過量に占める割合で評価する。これは、各車線において、その車線から出発した車両の通過量をその道路の総通過量で割った値である。

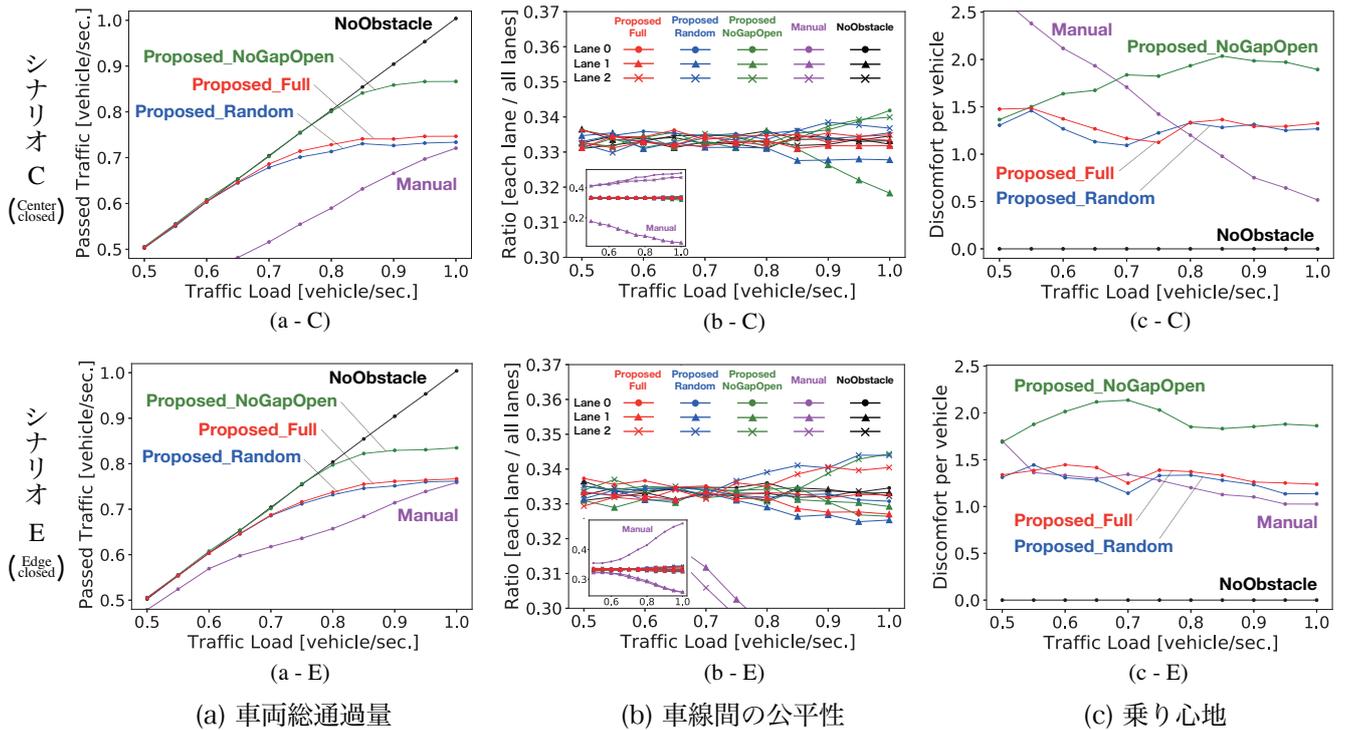


図 7: シミュレーション結果

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、加速度とジャークを用いて推定した値であり、以下の操作で算出する。

Wang らは [10] 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ている。彼らは、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。

$$d(t) = 0.19 a_{p+}(t) + 0.53 a_{p-}(t) + 0.27 j_{r+}(t) + 0.34 j_{r-}(t) \quad (4)$$

$a_{p+}(t)$ 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 $d(t)$ を計算する。ここで、式 4 に必要なジャークを求めるために加速度を数値微分する必要がある。しかしながら、本稿のシミュレーション評価で用いる SUMO から得られる車両の加速度は細かい増減を繰り返すので、そのまま数値微分するとさらに変動が大きくなってしまふ。そこで、最小二乗法を用いたフィルタリングを施すことで、加速度の軌跡を滑らかな曲線にする [11]。本稿では、各時刻の加速度の点に対

して、その点を中心とする 21 個の点からなる軌跡を 2 次の多項式で近似し、その 2 次曲線の中心の時刻の点を採用した。

以上の操作で加速度の軌跡を滑らかにしたら、中心差分法を用いて加速度を数値微分することでジャークを計算する。加速度とジャークが揃ったら、式 4 を用いて不快度 $d(t)$ を計算する。最後に、 $d(t)$ 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 ($d(t) \geq 2$) 場合に着目したため、この数値積分において $d(t) < 2$ の場合は無視するものとした。

5.4 シミュレーション結果

各シナリオ、各設定に対してシード値を変えて 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。図 7 に結果を示す。各評価において、各モデルはより NoObstacle に近いことが望ましい。各モデルはシナリオ C, E それぞれで類似した傾向を示しており、車両流入量が大きい (< 0.6 台/秒) 場合、モデル間の車両通過量、車線間の公平性の差が大きくなっている。Proposed_NoGapOpen は車両通過量が最も大きい、乗り心地が最も悪くなっている。一方、Proposed_Full は車線間の公平性、乗り心地を悪化させることなく比較的高い車両通過量を達成している。以下で、各指標に着目して議論する。

車両総通過量

両シナリオにおいて、Proposed_NoGapOpen で最も車両総通過量が大きくなっている。このモデルでは、車間

距離調整のための減速を行わないので、高速のまま車線変更が行われる結果、一秒あたりの車両通過量が増えている。(その代償として乗り心地は悪化している。)一方、Proposed_Full, Proposed_Random は、車頭時間を調整するための減速を全ての車両が行っているため、車速は全体的に緩やかになり、一秒あたりの車両通過量が減っている。

車線間の公平性

両シナリオにおいて、Proposed_Full で最も車線間の公平性が高く維持されている。これは、Proposed_Full では、各車線の車両密度に応じて適切に移動先の車線を決定していることで、渋滞や交通流の集中によって一時的に一部分の車両密度が高くなったとしても、その車線を避けることができるためである。

シナリオ E において、各モデル (Manual は除く) の封鎖車線の車両通過量が比較的大きい傾向がある。これは、通過車線は車線変更を受け入れる際にその車両との衝突を避けるための減速が生じてしまい、その車線の後方車両に減速が伝播し、一秒あたりの車両通過量が減るためである。

乗り心地

両シナリオにおいて、Proposed_NoGapOpen で最も不快度が高くなっている。これは、予め車間距離を調整しないことによって、車線変更を即座に達成できない場合が増え、かつ、車線変更を即座に達成できなかった場合に短い時間で急激に減速することになるためである。

両シナリオにおいて、Proposed_Full の方が Proposed_Random よりもわずかに不快度が高くなっている。これは、車線変更を受け入れた際に、受け入れた側の車両の不快度が高くなりやすい傾向があるためである。Proposed_Full では、中央車線の車両は前方の車両密度が高い場合は車線変更をするため、端の通過車線は車線変更を受け入れる頻度が増え、不快度が高くなりやすい。一方、Proposed_Random では、中央車線の車両は前方で渋滞が生じていても半数は直進する。直進した車両は低速になるまで減速をすることになるが、この減速は緩やかであり、不快度は高くはない。したがって、渋滞が生じている車線を避ける Proposed_Full の方が、渋滞が生じている車線を避けない Proposed_Random よりも不快度がわずかに高くなってしまっている。

6. まとめ

3車線道路における突発的な障害物に対して、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適切に各車両の移動先の車線を決定することで、協調的な車線変更を可能とする手法を提案した。SUMO を用いたマイクロシミュレーションにより、提案手法は車線間の公平性と乗り心地を悪化させることなく十分に高い車両交通量を達成できることを確認した。本稿で提案した手法の基本戦略は、4車線以上の道路上に1車線を封鎖する障害

物が生じた環境にも適用することが可能である。

なお、紙面の都合上掲載できていないが、車線間の車両流入台数に偏りがある場合においてもシミュレーションを行った結果、各指標において Proposed_Full と Proposed_Random は、上記の結果と同様の大小関係を維持したまま差が大きくなることが確認された。

本稿での評価は、全ての車両が提案手法に基づく車線変更や車間距離の調整指示に従うものとしているが、実際にはこれらの指示に従わない車両が存在することが見込まれる。今後、指示に従わない車両や車々間通信を行わない車両を含む場合の評価、並びにこうした条件における性能改善方法の検討を行う予定である。また、各パラメータが提案手法の性能に与える影響に関して調査できていないため、今後、これを調査して、交通流に対する影響の定式化を試みる予定である。

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, 信学技報, Vol. 119, No. 8, pp. 37-41 (2019).
- [3] Simulation of Urban Mobility (SUMO), 入手先 <<http://sumo.dlr.de/wiki/>> (参照 2021-01-19).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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, 情処研報, Vol. 2018-ITS-75, No. 20, pp. 1-6 (2018).
- [8] A. Wegener, M. Piorowski, 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).
- [9] S. Krauß, P. Wagner and C. Gawron: Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow, Physical Review E 55, pp. 5597-5602 (1997).
- [10] 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).
- [11] A. Savitzky and M. J. E. Golay: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, Analytical Chemistry, Vol. 36, No. 8, pp. 1627-1638 (1964).