

突発的障害物回避のための協調的車線変更制御の 5G NR-V2X Mode 2を想定したシミュレーション

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即座に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、多車線道路において単一車線が封鎖された場合を想定し、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・受け入れ制御手法を提案した。また、交通流シミュレータ SUMO を用いて、交通量・公平性・乗り心地の3つの観点から本手法の性能を評価し、車々間通信を用いない場合に対する優位性を示した。しかしながら、ここでは肝心の通信部分のシミュレーションが簡略化されていた。そこで、離散事象ネットワークシミュレータ ns-3 を用いて、最新のセルラ通信ベースの V2X 通信である 5G NR-V2X を想定したシミュレーションを導入する。ns-3 の拡張モジュールである MoReV2X を用いた 5G NR-V2X の通信のシミュレーションと SUMO による車両挙動のシミュレーションを連動させ、5G NR-V2X での車々間通信による車両の挙動の変化を伴うシミュレーションを実施し、4 車線での協調的車線変更制御の効果の基礎的な検証を行った。

キーワード：障害物回避, 協調走行, SUMO, ns-3, 5G NR-V2X Mode 2

Simulation assuming 5G NR-V2X Mode 2 of cooperative lane change control for sudden obstacle avoidance

SHINKA ASANO¹ SUSUMU ISHIHARA²

1. はじめに

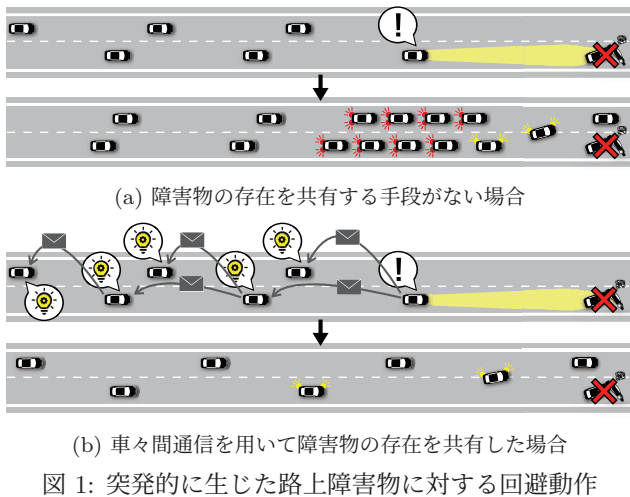
近年、交通流の効率・安全性の向上を目的として、車々間通信を用いた安全運転支援や自動運転技術の研究が盛んに行われている [1]。今日の道路環境において、車両事故や積載物の落下によって突発的に走行道路の一部が封鎖された場合、自由な交通状態から不自由な交通状態への急激な変化によって走行効率が低下し、図 1(a) のような渋滞に陥る可能性が高い [2]。このような状況において、障害物を検知した車両が車々間通信を用いて障害物の存在を即座に後続車両に通知すれば、後続車両は事前に障害物回避のための速度調整や車線変更をすることができるため、図 1(b) のような安全かつ円滑な障害物回避の実現が見込まれる。

石原らは [3] において、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単純なルールベースの戦略を提案した。加えて、筆者らは [4] において、上記の手法を多車線 (3 車線以上) 道路にも適用できるように拡張した。交通流シミュレータ SUMO を用いて、交通量・乗り心地・公平性の3つの観点から本手法の性能を評価し、車々間通信を用いない場合に対する優位性を示した。しかしながら、これらでは肝心の通信部分のシミュレーションが簡略化されていた。そこで本稿では、離散事象ネットワークシミュレータ ns-3 を用いて、詳細な無線通信モデルを含めたシミュレーションを試みた。

V2X (Vehicle-to-Everything) 通信の手段として、従来検討が進められてきた IEEE 802.11p ベースの技術に代わ

¹ 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻

² 静岡大学大学院工学領域



り、セルラ通信ベースの技術、Cellular-V2X が利用される見込みが高まってきている。移動通信システムの仕様策定を行う国際標準化団体 3GPP(Third Generation Partnership Project) は、5G New Radio(NR) をベースにした C-V2X(5G NR-V2X) [5] の標準化をリリース 16 [6] として 2020 年 7 月に完了させた。5G NR-V2X では、基地局が車両ネットワークにおける無線通信リソースを集中管理する Mode 1 と、車両間で自律分散的にリソースを管理する Mode 2 をサポートしている。本稿のシミュレーションでは、5G NR-V2X Mode 2 を対象とする。

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 と ns-3 を用いたシミュレーションモデルについて説明し、5 章でシミュレーションの結果と考察を示す。最後に、6 章で本稿をまとめる。

2. 関連研究

合流地点や突発的な障害物の発生地点では、その車線を走行する車両らに車線変更が強いられる。このとき、不適切な車線変更によって受け入れ側で急減速が生じると、それが後続車両に急速に伝搬され、結果として渋滞を招いてしまう可能性がある [7]。近年、このような渋滞を緩和させるために、無線通信を用いた車両の協調動作の研究が盛んに行われている。本章では、これらの研究について述べる。

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、非通信車両をセンサで検知している通信車両がその存在を他通信車両に共有することで、合流支援制御における安全性の向上を目指している [9]。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 [10]。CARMA における合

流支援では、本線車両と合流車両が路車間・車々間通信を介して走行情報を交換し、車線変更のための速度調整を最適化することを試みており、実証実験が進められている [11]。

MuCCA(Multi-Car Collision Avoidance) プロジェクトでは、車々間通信を用いた複数車両による障害物回避のための次世代運転支援システムを開発している [12]。Wartnaby らは、MuCCA を搭載した車両 MEV(MuCCA equipped Vehicle) が障害物を回避する際の軌道を最適化する方式を提案している [13]。この方式では、周辺の非 MEV の予測軌道だけを考慮した“希望軌道”と、周辺の MEV の軌道を追加で考慮した“計画軌道”を用いる。各 MEV は希望軌道と計画軌道の 2 つをブロードキャストすることで、各 MEV が他の MEV の希望軌道を (弱く) 回避するように動作し、協調行動を実現する。これらの研究では、限られ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が、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が対象という点で異なる。

石原らは [3] において、2 車線道路における障害物回避のためのルールベースの手法を提案した。ここでは、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ことで、障害物回避の円滑化を試みた。筆者らは [4] において、上記の手法を多車線 (3 車線以上) 道路にも適用できるように拡張した。ここでは、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推定車両密度に基づい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させ、車線間の公平性を向上させることを試みた。しかしながら、これらでは肝心な通信部分のシミュレーションが簡略化されていたため、本稿では離散事象ネットワークシミュレータ ns-3 を用いて、5G NR-V2X Mode 2 をの利用を想定したシミュレーションを実施した。

3. 提案手法

本章では、筆者らが提案した多車線 (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を説明する。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円滑に障害物を回避する。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推定車両密度に基づいて車両の移動先の車線を決定させることで、通過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。

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、

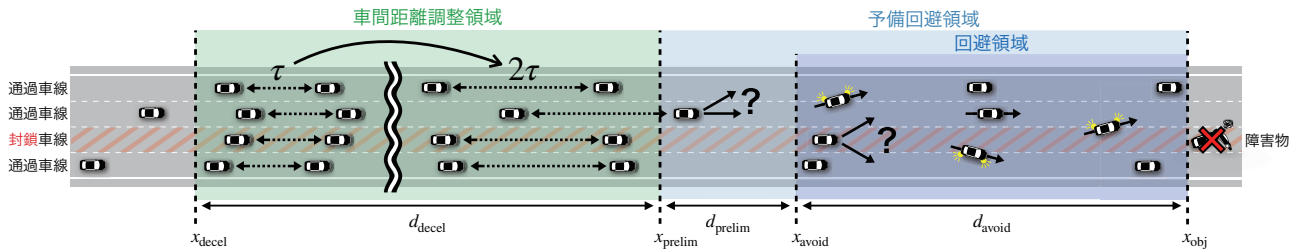


図 2: 車両と障害物との距離に基づいたルールベースの制御

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。
- 車両は自身の走行情報（位置、速度等）を含むメッセージ（例えば CAM(Cooperative Awareness Message)）を定期的にブロードキャストしている。

3.2 基本戦略

本手法では、各車両は自身の位置 x と障害物の位置 x_{rmobj} との距離 $d = x_{rmobj} - x$ に基づいて動作を決定する。そのため、図 2 に示すように、障害物より上流を 3 つの領域に分割する。車両が障害物によって封鎖されている車線（封鎖車線）を走行していて、且つ $0 < d \leq d_{avoid}$ を満たす領域（回避領域）に位置する場合、その車両は車線変更を試みる。車両が障害物のない車線（通過車線）を走行していて、且つ $0 < d \leq d_{avoid} + d_{prelim}$ を満たす領域（予備回避領域）に位置する場合、その車両は車線変更を試みる。車両が $d_{avoid} + d_{prelim} < d \leq d_{avoid} + d_{prelim} + d_{decel}$ を満たす領域（車間距離調整領域）に位置する場合、車両は車間距離を徐々に広げる。

この戦略では、予備回避領域の範囲は回避領域よりも広く設計している。この理由は、通過車線の車両が早めに車線変更をすることで、封鎖車線の車両を受け入れるスペースがより設けられるためである。ただし、2 つ以上の通過車線が隣接していない場合、予備回避領域は省略される。例えば、3 車線道路の中央車線が封鎖されている場合、両端の通過車線の車両は障害物から離れる方向に車線変更をすることができない。この場合、 $d_{prelim} = 0$ となる。

3.3 障害物発見通知

無線通信機能を持つ車両はカメラ・LiDAR などのセンサーで障害物を検知すると、障害物を追い越すまで障害物の位置・車線情報を含むメッセージを後続車両へ向けて定期的にブロードキャストする。障害物発見通知を受信した車両は、自身の位置が障害物の後方 1 km 以内ならば、取得した情報を後続車両へ向けてブロードキャストする。このマルチホップによって、障害物の後方 1 km 以内の全ての通信車両に障害物の存在を共有することができる。

3.4 車頭時間の調整

車間距離調整領域に位置する全ての車両は、回避・予備回避領域で円滑に車線変更・受け入れができるようにするために、車頭時間を通常の 2 倍になるように速度制御を行う。車頭時間とは、ある地点を前走車が通過してから自車はその地点を通過するまでの時間である。車間距離調整領域に進入した車両は、位置 x_h に到達するとき車頭時間が通常の 2 倍になるように、現在速度 v に基づいて減速度を計算する。この x_h は、封鎖車線の車両ならば x_{avoid} 、通過車線の車両ならば x_{prelim} である。ただし、車頭時間を増大させるための減速の際は、乗り心地の悪化を防止するために加速度 $a_{comfort}$ を下回らないようにする。

3.5 適応的車線変更

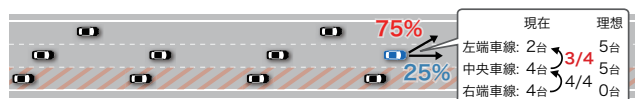
障害物回避において、障害物に近づく方向への車線変更はしないものとする。両端の車線以外を走行する車両には移動先の車線候補が 2 つある。封鎖車線の車両ならば左右の車線のどちらかを選択することができ、通過車線の車両ならば障害物から離れる方向へ車線変更するかそのまま直進するか選択することができる。本手法では、これらの車両の移動先の車線を以下の戦略 1（混雑車線の回避）、戦略 2（車線間のバランス調整）によって選択する。

戦略 1: 混雑車線の回避

図 3(a) に示すように、車両と障害物との間の各移動先の車線候補の交通量に注目して、混雑している車線は回避する。まず、他車両から受信した CAM に含まれる固有車両 ID と位置情報から、自身より前方-障害物間の各車線の車両数をカウントする。移動先の車線候補 a と b の車両数 m_a 、 m_b の合計のうち、どちらかの車線候補の割合



(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: 各車線の推定車両台数に基づいた移動先車線を選択

表 1: 4 車線道路の右から 2 番目の車線が封鎖された場合の各車線における各方向への移動確率

車線の種類	車線番号	現在の車両数	理想の車両数	右車線変更を選択する確率	左車線変更を選択する確率	直進を選択する確率
通過車線 (左端)	3	m_3	$M/3$	$P_{3 \rightarrow 2} = 0.0$	$P_{3 \rightarrow 4} = 0.0$	$P_{3 \rightarrow 3} = 1.0 - (P_{3 \rightarrow 2} + P_{3 \rightarrow 4}) = 1.0$
通過車線	2	m_2	$M/3$	$P_{2 \rightarrow 1} = 0.0$	$P_{2 \rightarrow 3} = \frac{M/3 - (1.0 - P_{2 \rightarrow 4})m_3}{m_2} = \frac{M/3 - m_3}{m_2}$	$P_{2 \rightarrow 2} = 1.0 - (P_{2 \rightarrow 1} + P_{2 \rightarrow 3}) = \frac{2M/3 - (m_0 + m_1)}{m_2}$
封鎖車線	1	m_1	0	$P_{1 \rightarrow 0} = \frac{M/3 - (1.0 - P_{0 \rightarrow 1})m_0}{m_1} = \frac{M/3 - m_0}{m_1}$	$P_{1 \rightarrow 2} = \frac{M/3 - (1.0 - P_{2 \rightarrow 3})m_2}{m_1} = \frac{2M/3 - (m_2 + m_3)}{m_1}$	$P_{1 \rightarrow 1} = 0.0$
通過車線 (右端)	0	m_0	$M/3$	$P_{0 \rightarrow 1} = 0.0$	$P_{0 \rightarrow 1} = 0.0$	$P_{0 \rightarrow 0} = 1.0 - (P_{0 \rightarrow 1} + P_{0 \rightarrow 1}) = 1.0$

が閾値 L (例えば 0.6) を超えている場合, その車線に渋滞が生じていると判断して候補から除外する. すなわち, $m_i / (m_a + m_b) > L$ を満たす車線 $i \in \{a, b\}$ は候補から除外し, 残った候補を移動先の車線に決定する. 候補が 2 つ残った場合, 戦略 2 により移動先の車線を選択する.

戦略 2: 車線間のバランス調整

図 3(b) に示すように, 各通過車線の車両数が均等になるように各車両の移動先の車線を決定する. まず, 他車両から受信した CAM に含まれる固有車両 ID と位置情報から, 自身より後方の各車線の車両数をカウントする (自身を含む). ここで, 走行道路の車線数を $n (\geq 1)$, 各車線の番号を $i \in \{0, 1, \dots, n-1\}$, 封鎖車線の番号を c , 各車線の車両数を m_i , $M = \sum_{i=0}^{n-1} m_i$ とする. 車両を $(n-1)$ 本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車両数は $M/(n-1)$ になる. 各車線の車両数をこの理想に近づけるように, 各車線における各方向への移動確率 $P_{i \rightarrow j}$ ($j \in \{i-1, i, i+1\}$) を以下の手順で求める.

右端の車線における右車線変更, 左端の車線における左車線変更, 封鎖車線における直進, 障害物に近づく方向への車線変更をする確率は 0.0 にする.

$$P_{0 \rightarrow -1} = 0.0, \quad P_{n-1 \rightarrow n} = 0.0, \quad P_{c \rightarrow c} = 0.0, \quad (1)$$

$$P_{i \rightarrow i+1} = 0.0, \quad i \in \{0, 1, \dots, c-1\}, \quad (2)$$

$$P_{i \rightarrow i-1} = 0.0, \quad i \in \{c+1, c+2, \dots, n-1\}. \quad (3)$$

次に, 車線 i から車線 j ($j \neq i$) に移動する確率 $P_{i \rightarrow j}$ を考える. まず, 車線 j の車両数 m_j と理想の車両数 $M/(n-1)$ との差分をとることで, 車線 j へ移動するべき車両数を求める. このとき, 車線 j において $P_{j \rightarrow j+(j-i)} \times m_j$ 台数分は車線変更をしてその車線から離れるため, 車線 j の車両数と理想の車両数との差分は $M/(n-1) - (1.0 - P_{j \rightarrow j+(j-i)})m_j$ になる. この台数分を車線 i から車線変更をするように移動確率 $P_{i \rightarrow j}$ を求める. ただし, もし $P_{i \rightarrow j} > 1.0$ ならば $P_{i \rightarrow j} = 1.0$, $P_{i \rightarrow j} < 0.0$ ならば $P_{i \rightarrow j} = 0.0$ とする.

$$P_{i \rightarrow i-1} = \frac{M/(n-1) - (1.0 - P_{i-1 \rightarrow i-2})m_{i-1}}{m_i}, \quad i \in \{1, 2, \dots, c\}, \quad (4)$$

$$P_{i \rightarrow i+1} = \frac{M/(n-1) - (1.0 - P_{i+1 \rightarrow i+2})m_{i+1}}{m_i}, \quad i \in \{c, c+1, \dots, n-2\}. \quad (5)$$

最後に, 移動確率の合計が 1.0 になるように直進する確

率 $P_{i \rightarrow i}$ を求める.

$$P_{i \rightarrow i} = 1.0 - (P_{i \rightarrow i-1} + P_{i \rightarrow i+1}), \quad i \in \{0, 1, \dots, c-1, c+1, \dots, n-1\}. \quad (6)$$

具体例として, 4 車線道路の右から 2 番目の車線が封鎖された場合の各車線における各方向への移動確率を表 1 に示す. この場合, 車線 1 と車線 2 の車両は 2 つの移動先の車線候補から選択する必要がある. 車線 1 の車両は確率 $\frac{M/3 - m_0}{m_1}$ で右車線変更, 確率 $\frac{2M/3 - (m_2 + m_3)}{m_1}$ で左車線変更を選択する. 車線 2 の車両は確率 $\frac{M/3 - m_3}{m_2}$ で左車線変更, 確率 $\frac{2M/3 - (m_0 + m_1)}{m_2}$ で直進を選択する.

4. シミュレーションモデル

障害物回避のための車両制御は車々間通信の結果に依存し, 車々間通信は車両の位置に依存する. この相互作用を実現するために, 本稿では交通流シミュレータ SUMO (Simulation of Urban MObility) 1.6.0 [14] と離散事象ネットワークシミュレータ ns-3.22 [15] を用いたフィードバックループシミュレーション [16] を行った. ここでは, 図 4 に示すように, SUMO と ns-3 間で TCP 接続を確立し, タイムステップ毎に以下の操作を行う. SUMO のシミュレーションで得られた車両の位置情報を ns-3 に送信し, その情報を基に ns-3 のシミュレーションをする. ns-3 のシミュレーションで得られた車々間通信の結果を SUMO にフィードバックし, その情報を基に障害物回避の制御をする. この車両位置情報と車々間通信情報の交換の繰り返しをフィードバックループと呼ぶ.

4.1 環境設定

図 5 に示すような, 片側 4 車線 (左側が追い越し車線) の 1 km の高速道路上に障害物が生じた状況を想定した. 障害物役の車両はシミュレーション開始から 10 秒後に移動を開始し, 始点から 950 m 地点の右から 2 番目の車線に停止する. 車両は全て乗用車で, ポアソン到着モデルに従って道路に流入する. 車両は初期速度 16.7 m/s でランダムな車線から出発し, 制限速度 33.3 m/s で走行する. 車両は 360 度, 半径 100 m を検知可能なセンサの搭載を想定し, 検知判定ではオクルージョン (物体の位置関係による遮蔽) を考慮した. ここでは, 車両の車体を成す長方形の各頂点とその中点を測定点とし, センシングを行う車両の中心点と

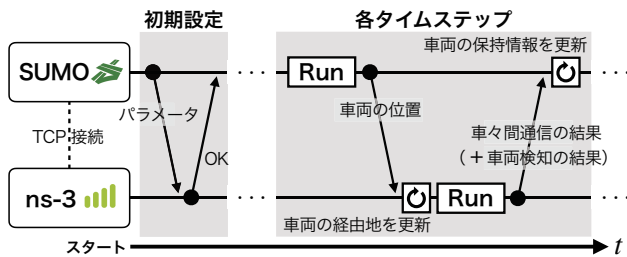


図 4: SUMO と ns-3 間のフィードバックループ

検知可能範囲内の対象車両の各測定点を線で結んだときに他車両と交わらない線分が 2 本以上ある対象車両を検知可能とした。シミュレーションパラメータを表 2 に示す。

4.2 SUMO の設定

障害物回避のための車両制御をするために、SUMO の制御用インターフェースである TraCI(Traffic Control Interface) [17] を用いた。また、車両が障害物を右側からも追い越せるようにするために、SUMO のオプションである “-lanechange.overtake-right” を用いた。

車両は SUMO のデフォルトの追従走行モデル (Krauss) [18] 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) [19] に従って車線変更をする。このモデルは、以下の動機に基づいて車線変更をする。

- (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: 左折するための左車線への車線変更)
- (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の車線変更)
- (3) **戦術的車線変更** 早く移動するための車線変更 (例: 追い越しのための車線変更)
- (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の車線変更)

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 1621 にして走行する。これは、4 つの動機に基づいた車線変更、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、障害物を直接検知した車両及び障害物発見通知を受信した通信車両は、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、車線変更の動機は全て無効化されている。

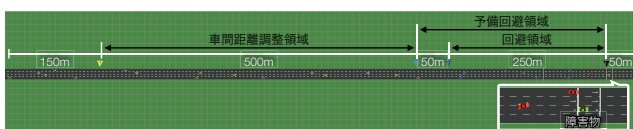


図 5: SUMO GUI で可視化したシミュレーションの様子

表 2: シミュレーションパラメータ

シミュレーション時間	400.0 s
タイムステップ長	0.05 s
$d_{\text{avoid}}, d_{\text{prelim}}, d_{\text{decel}}$	250 m, 50 m, 500 m
a_{comfort} (車頭時間の調整)	-2.94 m/s ²
閾値 L (混雑車線の回避)	0.6
SUMO:	
車両の長さ, 幅	4.47 m, 1.795 m
最小車間距離	2.5 m
通常車頭時間 (τ)	2.0 s
車線変更の所要時間	3.0 s
LC2013 車線変更モード	1621
初期速度, 制限速度	16.7 m/s, 33.3 m/s
最大加速度, 最大減速度	2.9 m/s ² , 7.5 m/s ²
ns-3:	
通信方式	5G NR-V2X Mode 2
周波数, 帯域幅	5.9 GHz, 10 MHz
チャンネルモデル	3GPP Highway [21]
送信電力	23 dBm
初期 RSRP 閾値 (SPS 方式)	-128 dBm
Numerology (μ)	0
MCS	13
サブチャンネルサイズ	10 RBs
HARQ 再送信	Disabled
CAM のパケットサイズ	300 bytes
CAM の送信間隔	0.1 s
CAM の有効期限	0.2 s
CAM+障害物情報のパケットサイズ	450 bytes
障害物情報の付与間隔	0.2 s, 1.0 s, Inf.
障害物情報の有効期限	60.0 s
車載センサの検知可能範囲	100.0 m

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。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 、車頭時間調整の所要時間を $v/(x_h - x)$ 、最小加速度を a_{comfort} とした。

4.3 ns-3 の設定

5G NR-V2X Mode 2 [5] のシミュレーションをするために、ns-3 の拡張モジュールである MoReV2X [20] を用いた。なお、ns-3 は最新で ns-3.35 がリリースされているが、MoReV2X はまだ ns-3.22 までしかテストされていないため、本稿では ns-3.22 を採用している。

5G NR-V2X の評価のための 3GPP ガイドラインでは、Highway と Urban の 2 つのシナリオにおけるサイドリンクチャンネルモデル [21] が新たに定義されている。MoReV2X では、Highway シナリオにおけるチャンネルモデルが実装されており、本シミュレーションではこれを用いる。このモデルでは、送信車両と受信車両間のリンクに見通しがある LOS(Line-Of-Sight) と、リンクが車両によって封鎖さ

れている NLOSv の 2 つのチャンネル状態における伝搬損失とシャドウイングが考慮されている。

5G NR-V2X Mode 2 では、車両ネットワークにおける無線通信リソースの管理を基地局に依存することなく、周辺車両間において自律分散的に制御している。MoReV2X では、リソーススケジューリング方式として、チャンネルセンシングに基づいてリソースを選択して一定期間使い続ける SPS(Semi-Persistent Scheduling) 方式と動的にリソースを選択する Dynamic 方式が実装されているが、本シミュレーションでは SPS 方式を用いる。SPS 方式では、車両は以下の手順でリソースを選択・予約する。まず、選択ウィンドウ内の候補リソース（未来）の周期位置にあたるリソース（過去）の RSRP(Reference Signal Received Power) を計測し、RSRP 閾値以上のリソースは候補から除外する。残った候補が全体（選択ウィンドウ）の 20% 以上になるまで、RSRP 閾値を 3 dBm 増加ずつ増加させて以上の操作を繰り返す。最後に、残った候補からランダムにリソースを採用し、一定期間利用する。以上の操作によって、パケット衝突の可能性が低いリソースを利用してパケットを送信することができる。本シミュレーションでは、初期 RSRP 閾値を -128 dBm に設定している。

車両は自身の走行情報（位置、速度など）を含む CAM を 0.1 秒間隔で送信する。車両は受信した CAM を 0.2 秒間保持し、その間はその CAM の送信車両を把握しているものとする。障害物をセンサで検知した車両は障害物を追い越すまで障害物発見通知を一定間隔（例えば 1.0 秒間隔）で送信する。なお、本シミュレーションでは、センサで検知している障害物の位置情報を CAM に付与したメッセージを障害物発見通知としている。障害物発見通知を受信した車両は障害物情報を 60.0 秒間保持し、その間はその障害物を把握しているものとする。また、障害物発見通知を受信した位置が障害物の後方 1 km 以内ならば、そのパケットの ID と障害物情報を次の CAM に付与して送信する。ただし、受信した障害物発見通知が既に自身が送信したことのある ID のパケットならば、上記の操作はしない。

4.4 評価指標

交通量、乗り心地、公平性の 3 つの観点から提案手法を評価するため、以下のように評価指標を定める。

4.4.1 交通量

単位時間あたりの終点に到着した車両数 T_{passed} で評価する。終点に到着した車両数を N 、シミュレーションの終了時刻を t_{end} 、障害物が発生した時刻を t_{closed} とすると、 $T_{\text{passed}} = N / (t_{\text{end}} - t_{\text{closed}})$ となる。

4.4.2 乗り心地

車両が始点から終点までに経験した累積不快感で評価する。この不快感は、加速度とジャーク（加速度の変化率）を用いて推定した値で、以下の操作で算出する。

Wang らは [22] 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、不快感を導出している。時刻 t における不快感 $d(t)$ は以下の式で与えられる。

$$d(t) = \beta_1 a_{p+}(t) + \beta_2 a_{p-}(t) + \beta_3 j_{r+}(t) + \beta_4 j_{r-}(t). \quad (7)$$

$a_{p+}(t)$ 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 ($\beta_1 = 0.19, \beta_2 = 0.53, \beta_3 = 0.27, \beta_4 = 0.34$) を用いる。

式 (7) を用いるために、SUMO から得られた速度を最小二乗法 [23] でフィルタリングし、中心差分法で数値微分することで加速度を算出し、同様に加速度を微分することでジャークを算出した。終点に到着した車両の各時刻の不快感を式 (7) を用いて算出し、出発時刻から到着時刻まで数値積分することでその車両の累積不快感を算出した。ただし、本稿では不快感が高い場合に着目するために、 $\max\{d(t) - 4, 0\}$ を数値積分している。評価には、終点に到着した全ての車両の累積不快感の合計を用いる。

4.4.3 公平性

車線毎の交通量と乗り心地のバランスで評価する。ただし、ここで扱う車線は、車両が道路に流入したときの出発車線を基準とする。車線間の交通量や乗り心地の差が大きいほど、障害物による不利益が一部の車線に集中しているため、車線間の公平性は悪いと言える。

5. シミュレーション結果と考察

High Traffic（単位時間あたりの車両流入量の設定値=1.6 台/秒）と Low Traffic（0.8 台/秒）の 2 つのシナリオに対して、シード値を変えて 20 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。

5.1 車々間通信を用いた協調的車線変更の効果

提案手法に従う車両動作モデルを *Proposed_Full*、提案手法から車頭時間の調整機能を除いた車両動作モデルを *Proposed_NoGapOpen*、車々間通信機能を持たない手動運転の車両動作モデルを *Manual* とする。各車両動作モデルのシミュレーション結果を図 6-7 に示す。Low Traffic の場合、モデル間の交通量の差はないが、乗り心地においてはわずかに差が生じており、中でも *Proposed_Full* が最も不快感を抑えられている。High Traffic の場合、モデル間の交通量と乗り心地の差は顕著に現れている。

Manual は高い交通量を達成しているが、公平性が最も

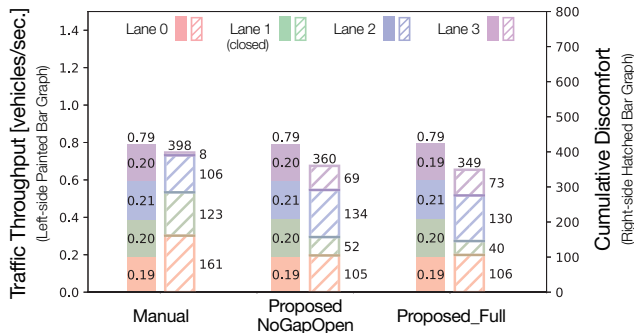


図 6: Low Traffic (車両流入量の設定値 0.8 台/秒) の結果

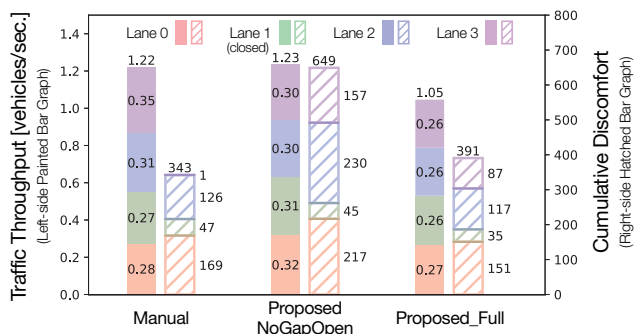


図 7: High Traffic (車両流入量の設定値 1.6 台/秒) の結果

悪くなっている。特に、車線 3 から出発した車両の交通量が突出して高く、乗り心地の悪化はほとんどないに等しい。この理由は、以下のように考えられる。車線 0, 2 の車両は封鎖車線 1 の車両を受け入れる必要があり、頻繁に減速を余儀なくされる。一方、車線 3 は封鎖車線 1 から最も離れているため、封鎖車線における障害物回避のための車線変更の影響を受けにくく、高い速度を維持しやすい。これにより、車線 3 と車線 2 間の速度差は大きくなり、車線 2 の車両は車線 3 への車線変更を達成しづらくなる。この結果、障害物の影響が車線 0-2 のみに集中してしまい、公平性が悪くなっている。ただし本シミュレーションでは、車線 2 のほぼ全ての車両は戦術的車線変更によって車線 3 へ車線変更を試みているが、SUMO の設定では戦術的車線変更を受け入れる際の緊急度は高くなく、速度差が大きい場合には受け入れ側は減速をしないため、車線変更が達成できなくなっている。しかしながら、現実においてこのような状況が生じたら、不適切な車線変更によって急減速が生じる可能性があり、極めて危険である。したがって、これは本研究においては望ましい結果とは言えない。

Proposed.NoGapOpen は最も高い交通量を達成している。さらに、車々間通信を用いることにより、*Manual* で生じていた公平性の悪化を防止することができている。しかしながら、乗り心地においては最も悪くなっている。これらの理由は、以下のように考えられる。事前に車間距離を空けるための減速をしないことによって、多くの車両は高速を維持することができるため、交通量は高くなる。一方で、車両が車線変更をする際には、受け入れるためのス

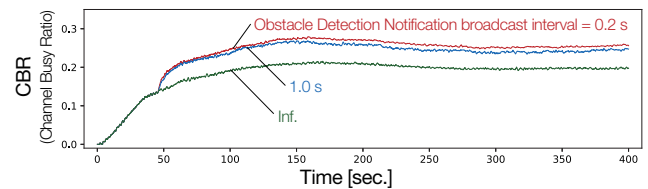


図 8: CBR の時間変化

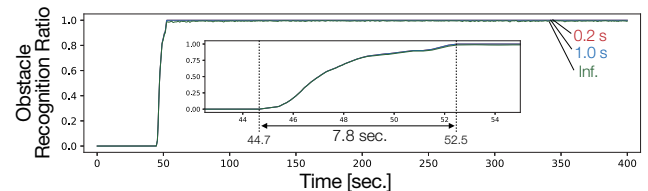


図 9: 障害物の認識率の時間変化

ペースが確保されていないため、急減速が生じやすくなる。この結果、不快感が高くなっている。

Proposed.Full は *Proposed.NoGapOpen* と比べて不快感を抑えることができている。さらに、交通量・乗り心地の両指標において車線間の公平性を高く維持することができている。これは、車々間通信によって障害物の存在を後続車両に通知し、事前に車間距離を空けておくことによって、円滑に障害物回避ができているためである。しかしながら、交通量においては最も低くなっている。これは、全ての車両が車間距離を空けるための減速をすることによって、全体的な車速が緩やかになるためである。

筆者らの先行研究 [3] [4] により、2-3 車線道路における障害物回避では、*Proposed.Full* は *Manual* よりも高い交通量を達成できることがわかっている（ただし、設定は多少異なる）。一方で、本稿の 4 車線道路においては、*Proposed.Full* よりも *Manual* の方が交通量が高くなった。この理由は、以下のように考えられる。2-3 車線道路においては単一車線の封鎖は道路全体に占める割合が大きく、封鎖車線の車両を全ての通過車線に均等に割り振る場合、一通過車線あたりの負担は大きい。このとき、提案手法による“全ての車両が事前に車頭時間を 2 倍にする”という制御は大きな効果を発揮する。一方、4 車線以上の道路においては単一車線の封鎖は道路全体に占める割合が小さくなり、この制御は過剰になる。つまり、車間距離を空けたが必要なかったということが多くなる。これによって、4 車線道路の場合には、*Proposed.Full* における“全ての車両が車間距離を空けて協調的に障害物回避することによる交通流円滑化効果”よりも、*Manual* における“一部の車線を犠牲にして残りの車線の交通量を維持することによる交通流円滑化効果”の方が上回る結果となった。これは改善の余地があるため、今後の課題である。

5.2 障害物発見通知による障害物の認識率の変化

障害物をセンサで検知した車両による障害物発見通知の

送信を 0.2 秒間隔, 1.0 秒間隔, Inf.(最初の一度の通知のみ)でシミュレーションを行い, 障害物の認識率に与える影響を調査した. 利用可能な RB(Resource Block)のうち, 使用されている RB が占める割合を CBR(Channel Busy Ratio)とする. また, 走行している全ての車両のうち, 障害物の存在をセンサまたは障害物発見通知によって把握している車両が占める割合を障害物の認識率とする. High Traffic における CBR の時間変化を図 8, 障害物の認識率の時間変化を図 9 に示す. 障害物発見通知の送信間隔を短くすると, それに伴い CBR が増加する. 一方で, 障害物発見通知の送信間隔を変化させても, 障害物の認識率に影響はない. これは, 障害物発見通知の送信を一度のみにしても, 障害物をセンサで検知する車両が多いことで頻りに障害物発見通知が送信されるためだと考えられる. 以上より, 5G NR-V2X Mode 2 による車々間通信の場合, 検知した車両は障害物発見通知を一度だけブロードキャストすることが最も適していることがわかった. また, 4 車線道路・High Traffic (車両流入量の設定値 1.6 台/秒)シナリオにおいては, 障害物を検知した車両が CAM に障害物情報を付与することで障害物の存在を通知する方法では, 後方 1km 以内の全ての通信車両に通知するために 7.8 秒の時間を要することがわかった.

6. まとめ

筆者らが [4] で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において, ns-3 の拡張モジュールである MoReV2X を用いた 5G NR-V2X の通信のシミュレーションと SUMO による車両挙動のシミュレーションを連動させ, 5G NR-V2X での車々間通信による車両の挙動の変化を伴うシミュレーションを実施した. 今回のシナリオの評価では, 通信を簡略化したシミュレーションと ns-3 を用いた詳細なシミュレーションとの大きな違いは現れなかったが, 今後の様々なシステムの評価にも今回の技法を適用してシミュレーションを行う予定である. また今後, 4 車線以上の道路での障害物回避における提案手法の改善や, 非通信車両を考慮した提案手法の改良を行う予定である.

参考文献

[1] 総務省: Connected Car 社会の実現に向けて, (online), available from (https://www.soumu.go.jp/main_content/000501373.pdf) (accessed 2021-01-19).

[2] B. Persaud et al.: Exploration of the Breakdown Phenomenon in Freeway Traffic, *Transportation Research Record*, Vol. 1634, No. 1, pp. 64-69 (1998).

[3] 石原進: 多車線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, 第 17 回 ITS シンポジウム 2019, 2019-1-A-04 (2019).

[4] 浅野心夏, 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).

[5] M. H. C. Garcia et al.: A Tutorial on 5G NR V2X Communications, *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, Vol. 23, No. 3, pp. 1972-2026 (2021).

[6] 3GPP TR 21.916 (V0.5.0): The 3GPP Summary of Rel-16 Work Items (2020).

[7] Y. Sugiyama et al.: Traffic jams without bottlenecks - experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam, *New Journal of Physics*, Vol. 10, No. 3, pp. 033001 (2008).

[8] H. Gunther et al.: The Potential of Collective Perception in Vehicular Ad-hoc Networks, *14th International Conference on ITS Telecommunications*, pp. 1-5 (2015).

[9] CAR 2 CAR Communication Consortium (C2C-CC): Guidance for Day 2 and Beyond Roadmap, (online), available from (https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2CCC_WP_2072_RoadmapDay2AndBeyond.pdf) (accessed 2021-07-23).

[10] Federal Highway Administration (FHWA): CARMA Program Overview, (online), available from (<https://highways.dot.gov/research/operations/CARMA>) (accessed 2021-07-23).

[11] T. Tiernan et al.: CARMA Testing and Evaluation of Research Mobility Applications, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (2019).

[12] Multi-Car Collision Avoidance (MuCCA), (online), available from (<https://mucca-project.co.uk>) (accessed 2021-07-23).

[13] C. Wartnaby et al.: Decentralised Cooperative Collision Avoidance with Reference-Free Model Predictive Control and Desired Versus Planned Trajectories, *arXiv preprint* (2019).

[14] P. A. Lopez et al.: Microscopic Traffic Simulation using SUMO, *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pp. 2575-2582 (2018).

[15] G. F. Riley et al.: The ns-3 Network Simulator, *Modeling and Tools for Network Simulation*, pp. 15-34 (2010).

[16] W. Liu et al.: Coordinative simulation with SUMO and NS3 for Vehicular Ad Hoc Networks, *2016 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, pp. 337-341 (2016).

[17] A. Wegener et al.: TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators, *11th Communications and Networking Simulation Symposium (CNS)*, pp. 155-163 (2008).

[18] S. Krauss et al.: Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow, *Physical Review E* 55, pp. 5597-5602 (1997).

[19] J. Erdmann: SUMO's Lane-Changing Model, *Modeling Mobility with Open Data, Lecture Notes in Mobility*, Springer (2015).

[20] L. Lusvarghi et al.: MoReV2X - A New Radio Vehicular Communication Module for ns-3, *TechRxiv preprint* (2021).

[21] T. Zugno et al.: Extending the ns-3 Spatial Channel Model for Vehicular Scenarios, *Proceedings of the Workshop on ns-3*, pp. 25-32 (2021).

[22] F. Wang et al.: A Study of the Relationship between the Longitudinal Acceleration/Deceleration of Automobiles and Ride Comfort, *Japanese Journal of Ergonomics*, Vol. 36, No. 4, pp. 191-200 (2000).

[23] A. Savitzky et al.: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, *Analytical Chemistry*, Vol. 36, No. 8, pp. 1627-1638 (1964).