

車両の相対的な位置関係に応じた 分散型センサ情報配信制御手法の評価

古川 魁斗¹ 高井 峰生² 石原 進³

概要：車車間通信を用いたセンサ情報の共有による車両がセンサで直接検知できない物体の存在に把握は、安全運転支援に有用である。しかしながら、車両密度が高い状況におけるセンサの検知範囲が重複した車両らによるセンサ情報の頻繁な配信は通信路の混雑を招き、それらセンサ情報の共有が困難となる。筆者らは、個々の車両が周辺車両との相対的な位置関係と道路構造に基づき、センサ情報の送信頻度を分散的に制御する手法を提案してきた。提案手法において、車両は周辺車両との相対的な位置関係や走行する道路における相対的な位置に基づき、自律的にセンサ情報の送信に対する優先度を計算し、この優先度に応じてセンサ情報の送信頻度を制御する。通信トラフィックを抑制しつつ、車両はセンサで直接検知できない障害物の位置を高い頻度で把握可能となるため、提案手法は安全運転支援に効果的であると考えられる。本稿では、車両密度が高いシナリオにおける本提案手法の性能をシミュレーションにより定量的に評価する。

Evaluation of a Distributed Sensing Data Dissemination Method based on Relative Vehicle Positions

KAITO FURUKAWA¹ MINEO TAKAI² SUSUMU ISHIHARA³

1. はじめに

今日の先進運転支援システム (Advanced Driver Assistance System: ADAS) における安全運転支援アプリケーションは、車両の運転者に対して、主に他車両や歩行者、建物等の障害物との衝突回避を支援する [1]。この支援は、RADAR や LIDAR、カメラ等の車載センサを用いた障害物の検知に基づき行われる。車両が障害物の衝突の危険性をセンサを検知した場合、安全運転支援アプリケーションは運転者に対して警告し、場合によっては制動を制御する。しかしながら、壁や車体等の遮蔽物によりセンサの視界が遮られる場合、その先にいる人や車両の存在をそのセンサのみを用いて把握することは困難である。

車車間 (Vehicle-to-Vehicle: V2V) 通信を用いて安全運転支援を行う車両の開発が現在進んでいる。V2V 通信とセンサを併用することで、センサのみを用いた交通状況把握

と比べて、より広範囲の車両の存在を把握することが可能となる。V2V 通信機能を有する車両 (以下、V2V 搭載車両) は自身の存在を周辺車両に通知するために、ビーコンと呼ばれる自身の位置や速度、進行方向が含まれたパケットを、Vehicular Ad-hoc Network (VANET) を介して定期的にブロードキャストする [2]。VANET とは複数の車両で動的に構成されるネットワークである。V2V 搭載車両はビーコンを受信することで、周辺車両の位置を把握することができ、センサのみを用いる場合と比べて、より広範囲の周辺の交通状況について把握することが可能となる。しかしながら、車両がセンサで直接検知できない V2V 通信機能を持たない車両 (以下、V2V 非搭載車両) の存在を把握することは難しい。

V2V 通信を用いた周辺の交通状況把握を補助する技術として、Collective Perception (以下、CP) が提案されている [3]。CP の概念は、車両や歩行者等が RADAR や LIDAR 等のセンサで検知した障害物の情報を共有することである。車両は、互いにセンサで取得した障害物の位置情報を

¹ 静岡大学大学院
² 大阪大学 / カリフォルニア大学ロサンゼルス校
³ 静岡大学学術院工学領域

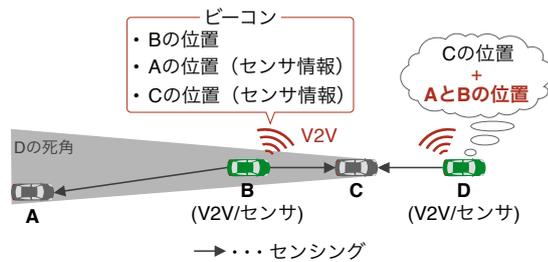


図 1: Collective perception を用いた周辺車両の位置把握

定期的に交換することで周辺の交通状況を把握する。センサで検知した車両の中に V2V 非搭載車両がいた場合、この車両の位置情報を V2V 搭載車両間で共有可能となる。

図 1 は V2V 搭載車両が CP を用いた周辺車両の位置把握を行うことで、センサの死角を走行する車両の位置を把握する様子を表している。図中灰色で示した車両 A と C は V2V 非搭載車両であり、緑色で示した車両 B と D は LIDAR を搭載した V2V 搭載車両である。車両 B は車両 A と車両 C の位置をセンサで直接検知できており、車両 D は車両 C をセンサで直接検知できているものの、センサの死角にいる車両 A と B は検知できていないとする。この時、車両 D は、車両 B が送信する自身の位置情報とセンサで取得した周辺車両の位置情報を受信することで、車両 C に加えて、それらの車両の位置を把握可能となる。

V2V 通信を用いた周辺車両の位置把握は、運転者の安全性向上が期待できる一方で、V2V 搭載車両の密度が高い場合は、安定した通信が困難な事による位置把握精度の低下が考えられる。日米欧における V2V 通信の規格は IEEE 802.11 で規格化されている無線通信技術を基にしており [4–6]、チャンネルアクセス制御は CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) である [7]。このため、車両密度が高い場合、定期的なビーコンの配信による通信路の混雑や隠れ端末問題が発生し、ビーコンの受信率低下が指摘されている [8]。安全運転支援アプリケーションでは、車両が把握している障害物の位置の精度が十分に高い必要があることから、ビーコンの最低受信頻度が規定されており [9]、ビーコンの受信率低下を抑制する方法が必要となる。

筆者らはこれまでに、車両の位置関係と道路構造に応じたセンサ情報の送信頻度制御手法を提案している [10]。[10] では、提案手法のアルゴリズムを述べ、V2V 搭載車両である全車両がランダムに流入した後、等速移動するシナリオにおけるシミュレーション評価により車両が提案手法を用いることで、通信量を抑制しつつ周辺車両を高い割合で把握可能となることを示した。

本稿では、V2V 搭載車両の台数と道路の車線数を変えたシナリオにおけるシミュレーションにより提案手法の有効性を評価した。提案手法は、少ない通信量で、CP を用いた車両による周辺車両の位置把握が事故回避に十分な精度

と頻度で可能とすることを目的としている。同手法では、車両は、周辺車両との相対的な位置関係に基づく優先度と合流車線や交差点等の走行位置に基づく優先度を自律的に計算し、それら優先度に応じてセンサ情報の送信頻度を制御する。筆者らの知る限り車両の位置関係と道路構造に基づいて CP での交通状況把握を考慮した分散型のセンサ情報の送信頻度制御方式は他に提案されていない。

以降、2 章にて CP とビーコンの送信制御に関する研究について述べ、3 章で提案手法の概要について述べる。4 章で提案手法の性能評価をシミュレーションにより行い、5 章でまとめを述べる。

2. 関連研究

2.1 Collective Perception

CP は、車両が V2V 通信を用いたセンサ情報の交換を行うことで、周辺の交通状況把握を補助する技術である。Rauch らは、車両が自身の RADAR や LIDAR 等で取得したセンサ情報と Vehicle-to-X communication (V2X) で得られたセンサ情報から周辺の交通状況把握を可能とするアーキテクチャを提案している [11]。Günther らはこのアーキテクチャを基にした交通状況把握技術を collective perception と称し、V2V 搭載車両の異なる普及率における CP の性能をシミュレーション評価している [3]。また、別論文にて、CP 可能な 2 台の車両が把握した障害物の位置精度を実走行実験で評価している [12]。実験により、CP を行う車両は、行わない車両と比べて、道路上に設置されたセンサの死角にある障害物の存在を 3 倍早く認識できることを確認している。現在、欧州では、European Telecommunications Standards Institute (ETSI) が CP 実現のための標準化を進めている [13]。

CP は V2V 搭載車両の運転者にとって有益となり得るが、車両台数増大に伴うパケットの受信率低下によって、CP による障害物の位置把握の性能低下が Günther らによって示唆されている。V2V 搭載車両の密度が高い環境では、送信待ち遅延の増加や隠れ端末問題によるパケットの衝突により、安定した通信が困難となる。これまでに、パケットの受信率を向上させるために、ビーコンの送信制御を行う方法が提案されてきた。

2.2 ビーコンの送信制御手法

Sommer らは、車両がチャンネル品質と配信するメッセージの優先度に応じてビーコンの送信頻度を分散的に制御する Adaptive Traffic Beacon (ATB) を提案している [14]。車両はチャンネル品質を、隣接車両台数、ビーコンの衝突数と Signal-to-Noise Ratio (SNR) の 3 種類の計算結果から推定する。メッセージの優先度は、メッセージの新しさ、送信相手までの距離、最も近い路側機までの距離、メッセージの配信率の計算結果から推定する。チャンネル品質が良い

程、つまり、隣接車両台数とビーコンの衝突回数が少なく、SNRが高い程、ビーコンの送信頻度が高くなるように車両が制御する。また、メッセージの優先度が高い程、即ち、メッセージが新しく、送信相手までの距離が短く、路側機までの距離が長い程、メッセージの配信率が低い程、ビーコンの送信頻度が高くなるように車両が制御する。

ETSI では、Channel Busy Ratio (CBR) に応じてビーコンの送信パラメータ（電力、頻度、データレート等）を制御する Decentralized Congestion Control (DCC) が標準化されている [15]。DCC では、既定の送信パラメータが割り当てられた複数の状態とその状態遷移機構が設けられ、車両は自身の状態を CBR に応じて遷移させることでビーコンの送信制御を行う。チャンネルが busy の時は、ビーコンの送信電力や送信頻度が低い状態に遷移し、チャンネルが idle の時は、ビーコンの送信電力や送信頻度が高い状態に遷移する。この結果、V2V 搭載車両の密度が高い環境においても、ビーコンの衝突が軽減され、車両は安定的にビーコンを受信可能となる。

しかしながら、上記で挙げた手法の共通の問題として、車両密度に基づいたビーコンの送信制御手法という点がある。ATB は、チャンネルの使用状況に即座に対応できるようにするため、メッセージの優先度よりもチャンネル品質の方が送信頻度の決定において高い重みが割り当てられている。DCC は、チャンネルの使用状況に応じてビーコンの送信制御を行うため、車両密度の影響度が大きい。車両密度に基づきビーコンの送信制御を車両が行う場合、重要なセンサ情報を持つ車両（例えば、路上にある障害物の存在をセンサで検知した車両や高速道路において本線に合流してくる車両の存在をセンサで検知した車両）が、そのような重要なセンサ情報を持たない車両と同様の送信電力や送信頻度に制御され、重要なセンサ情報が行き届かなくなり得る。また、これらの手法では、CP を用いた交通状況把握が前提にない。つまり、同様の障害物に関するセンサ情報の頻繁な配信により、重要なセンサ情報を持つ車両のセンサ情報配信が妨げられる恐れがある。更に、CP では車両が自身の位置や速度等に加えてセンサ情報を配信するため、車両が CP を用いない場合と比べて通信路の利用率が高くなる。そのため、それら手法がうまく動作せず、ビーコンの受信率が改善しない可能性が考えられる。

Günther らは、DCC を適用した車両が CP による周辺車両の存在把握を行った際の性能を、シミュレーション評価している [16]。彼らは、V2V 搭載車両の割合が 5 割以上の時、車両が位置把握している車両の割合が 8 割を超えると示している。しかしながら、DCC を用いた制御を行っていることから、同様の車両の位置がセンサ情報として頻繁に配信されていることが考えられる。V2V 搭載車両の普及過渡期において、V2V 搭載車両の割合が 5 割以上となるには時間を要する。そのため、より少ない V2V 搭載車

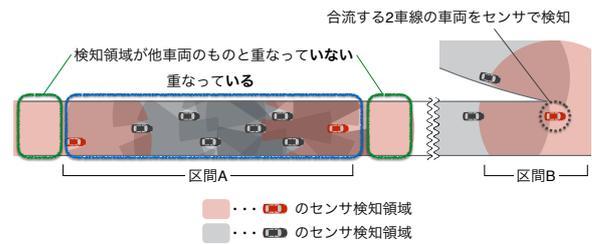


図 2: 制御方針

両数で車両による周辺車両の位置把握の割合を高くする必要がある。

3. 車両の位置関係と道路構造に応じたセンシング情報配信制御手法

本章では、我々の提案手法である車両の相対的な位置関係と道路構造に応じたセンシング情報の送信頻度制御手法について簡単に述べる。まず初めに、前提条件を述べ、提案手法の制御方針について述べる。続いて、送信頻度制御に係る優先度の分散的な算出方法について述べた後、センサ情報の送信頻度算出方法について述べる。

3.1 前提条件

道路上には V2V 搭載車両と V2V 非搭載車両が混在し、V2V 搭載車両は周囲 360 度の位置検知が可能な LIDAR とカメラを搭載しているものとする。V2V 搭載車両がセンサである車両の存在を検知した場合、その車両の位置に加えて、走行車線の ID と進行方向が分かるものとする。V2V 搭載車両は、CP による周辺障害物の位置把握を行うものとし、ビーコンには、自車両がセンサで検知した車両の位置、3.3.1 節にて述べる相対的な位置関係、センサの検知可能距離、走行車線の ID を含めるものとする。

3.2 制御方針

本提案手法では、車両がセンサで直接検知できない領域に関するセンサ情報が高頻度で配信されるような設計を目指す。そのために、多くの車両がセンサで直接検知できていない領域をセンサで検知している車両が優先してセンサ情報を配信するように制御する。図 2 は、センサ情報を優先して配信する車両を赤色で示したものである。赤色と灰色の領域は各車両がセンサで検知している領域である。区間 A において、赤色の車両がセンサで検知している領域の大部分は、灰色の車両がオクルージョンによりセンサで検知できていない領域であり、灰色の車両がセンサで検知している領域の大部分は、他の灰色の車両や赤色の車両がセンサで検知している領域と重なっている。一方で、区間 B では、赤色の車両は合流する 2 車線をセンサで検知しており、灰色の車両は十分に検知できていない。このため、赤色の車両が優先してセンサ情報を配信することで、周辺車

両はセンサで検知できていない領域における障害物の情報を高頻度で受信可能となる。このような制御を行うため、車両は相対的な位置関係に応じた優先度と道路構造に応じた優先度を算出し、これら優先度に基づいたセンサ情報の送信頻度制御を行う。

3.3 相対的な位置関係に応じた優先度

車両は相対的な位置関係に応じた優先度 R を、一定の車間距離以下で走行する V2V 搭載車両と V2V 非搭載車両で構成され複数車線にまたがる車群（以下、クラスタ）における位置関係を基に決定する。

3.3.1 相対的な位置関係の定義

クラスタにおける相対的な位置関係を以下に定義する。

- (1) **車群先頭車両** 前方 L_{front} [m] の複数車線において同進行方向の車両が存在しない車両
- (2) **車群末尾車両** 後方 L_{behind} [m] の複数車線において同進行方向の車両が存在しない車両
- (3) **車列先頭車両** 前方 L_{front} [m] の同一車線上に同進行方向の車両が存在しない車両
- (4) **車列末尾車両** 後方 L_{behind} [m] の同一車線上に同進行方向の車両が存在しない車両
- (5) **車群先頭補助車両** 先頭車両がいる車線から既定の車線数 (Observed Lanes: OL) だけ離れた車線にいる車列先頭車両
- (6) **車群末尾補助車両** 末尾車両がいる車線から OL だけ離れた車線にいる車列末尾車両
- (7) **中間車両** 同一車線前方における車群先頭車両、車群先頭補助車両もしくは他の中間車両のうち最も近くにいる車両から、その車両のセンサの検知可能距離だけ後方に離れた場所にいる車両
- (8) **一般車両** 上記のいずれにも該当しない車両

OL とは車両が LIDAR で高精度に位置検出可能な距離を車線数で表した定数である。車両は上記の順で該当する位置関係を求めていく。

3.3.2 相対的な位置関係の分散的な把握方法

各車両は自身の相対的な位置関係を自身のセンサ情報と V2V 通信を介して受信したビーコンを基に把握する。車両 i は自身の相対的な位置関係を次のようにして把握する。

車群先頭/末尾車両 車両 i は受信したビーコンの送信車両、もしくはセンサで直接検知した車両 j の位置 P_j と進行方向 D_j を把握する。更に、車両 i は自身の位置 P_i と進行方向 D_i を取得する。 $D_i = D_j$ の時、車両 i は車両 j との距離 $|\vec{P}_i - \vec{P}_j|$ を計算する。 $(\vec{P}_i - \vec{P}_j) \cdot \vec{v} > 0$ を満たす、つまり車両 i の前方にいる進行方向が同じ全ての車両 j において、 $|\vec{P}_i - \vec{P}_j| > L_{\text{front}}$ が成り立つ時、車両 i は自身を車群先頭車両と判断する。一方で、 $(\vec{P}_i - \vec{P}_j) \cdot \vec{v} < 0$ を満たす全ての車両 j において、 $|\vec{P}_i - \vec{P}_j| > L_{\text{behind}}$ が成り立つ時、車両 i は自身を車

群末尾車両と判断する (図 3a)。

車列先頭/末尾車両 車両 i は自身が車群先頭車両と車群末尾車両に該当しないと判断した場合、自身と車両 j の走行車線 IDL_i と L_j を確認する。 $L_i = L_j \wedge (\vec{P}_i - \vec{P}_j) \cdot \vec{v} > 0$ を満たす全ての車両 j において、 $|\vec{P}_i - \vec{P}_j| > L_{\text{front}}$ が成り立つ時、車両 i は自身を車列先頭車両と判断する。一方で、 $L_i = L_j \wedge (\vec{P}_i - \vec{P}_j) \cdot \vec{v} < 0$ を満たす全ての車両 j において、 $|\vec{P}_i - \vec{P}_j| > L_{\text{behind}}$ が成り立つ時、車両 i は自身を車列末尾車両と判断する。

車群先頭補助車両 車両 i は自身を車列先頭車両だと判断した場合、 L_i と最も近くにいる車群先頭車両の走行車線 L_h を確認する。 $L_i = L_h \pm kOL$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) の時、車両 i は自身を車群先頭補助車両と判断する (図 3b)。

車群末尾補助車両 車両 i は自身を車列末尾車両だと判断した場合、 L_i と最も近くにいる車群末尾車両の走行車線 L_t を確認する。 $L_i = L_t \pm kOL$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) の時、車両 i は自身を車群末尾補助車両と判断する (図 3b)。

中間車両 車両 i は自身が車群先頭補助車両と車群末尾補助車両に該当しないと判断した場合、距離 Y_i と Y_j を次の式に従い計算する。

$$Y_i = \|\vec{P}_x - \vec{P}_i\| - SD_x \quad (1)$$

ここで、 x とは同一車線前方における車群先頭車両、車群先頭補助車両もしくは他の中間車両のうち最も近くにいる車両であり、 P_x はその位置である。 SD はセンサの検知可能距離である。 $L_i = L_j$ を満たす全ての車両 j において、 $Y_i < Y_j$ が成り立つ時、車両 i は自身を中間車両と判断する (図 3c)。

3.3.3 優先度 R の決定

車両 i は自身の相対的な位置関係に応じて優先度 R_i を次のように決定する。

- 車群先頭車両もしくは車群末尾車両の時、 $R_i = R_{\text{max}}$ 。
- 車群先頭補助車両もしくは車群末尾補助車両の時、 $R_i = R_{\text{mid}}$ 。
- 一般車両の時、 $R = R_{\text{min}}$

R_{max} , R_{mid} , R_{min} は、 $1 \geq R_{\text{max}} > R_{\text{mid}} > R_{\text{min}} > 0$ を満たすような定数とする。

3.4 道路構造に応じた優先度

車両は道路構造に応じた優先度 S を特定の道路における位置に応じて算出する。算出方法は合流車線付近や交差点付近等の道路構造で異なるものとする。車両が道路構造を把握する方法は、カーナビゲーションに予め登録された地図情報を基に把握する方法や、Vehicle Information and Communication System (VICS) [18] で得られる道路の分岐案内や事故、工事等の道路交通情報により把握する方法、

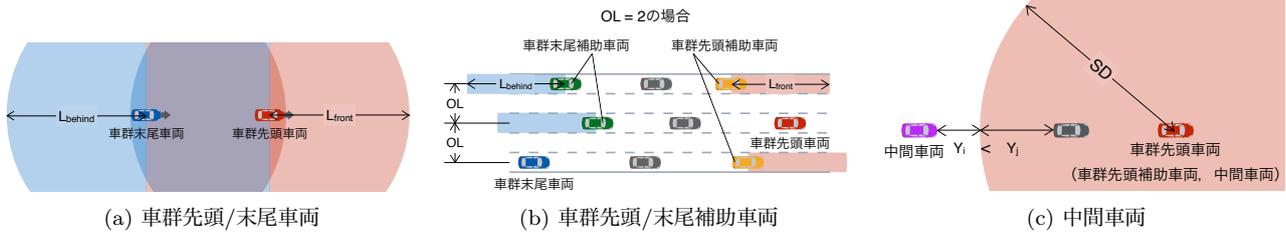


図 3: 相対的な位置関係の把握方法

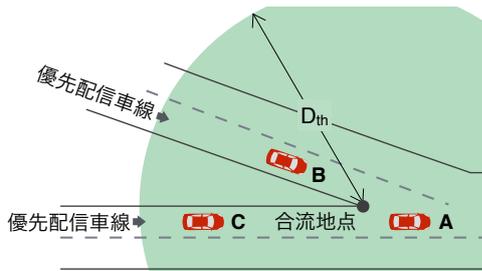


図 4: 合流車線付近における優先度 S の算出

High Definition (HD) map, ダイナミックマップといった車載センサや受信した周辺の交通情報を基に車両が作成する 3D 地図情報を基に把握する方法が考えられる [19, 20]. 以下では, 合流車線付近における優先度 S の算出方法について述べる.

図 4 のような合流車線付近において, ランプと本線の接続端を合流地点, 接続端を構成する 2 車線を優先配信車線とする. 優先配信車線を走行する車両 i は次の式に従い, 優先度 S_i ($0,1$) を算出する.

$$S_i = \max \left(1 - \frac{|\vec{P}_i - \vec{P}_m|}{D_{th}}, S_{min} \right), \quad (2)$$

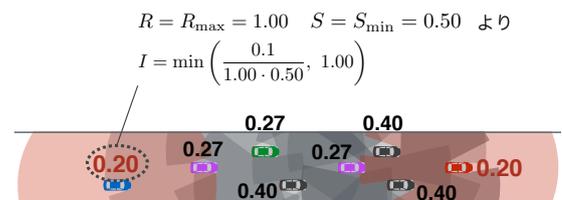
ここで, P_i と P_m はそれぞれ車両 i と合流地点の位置であり, D_{th} は優先度 S を計算する車両 i と合流地点の距離の閾値, S_{min} ($0,1$) は優先度 S の最小値である. 優先配信車線を走行しない車両は $S = S_{min}$ とする. 合流地点に近い車両程, 優先度 S は高くなる. 従って, 図中において車両 A, B, C の順に合流地点に近いとすると, それぞれの優先度 S である S_A, S_B, S_C の大小関係は, $S_A > S_B > S_C$ となる.

3.5 センサ情報の送信頻度算出方法

車両は相対的な位置関係に応じた優先度 R と道路構造に応じた優先度 S ($0,1$) を求めた後, 次の式に従いセンサ情報の送信間隔 $I[s]$ を決定する.

$$I = \min \left(\frac{I_{min}}{R \cdot S}, I_{max} \right) \quad (3)$$

ここで, I_{min} , I_{max} はそれぞれ最低送信間隔と最大送信間隔である. 優先度が高い車両程, センサ情報の送信間隔が I_{min} を下限として短くなり, その送信頻度が高くなる. 一

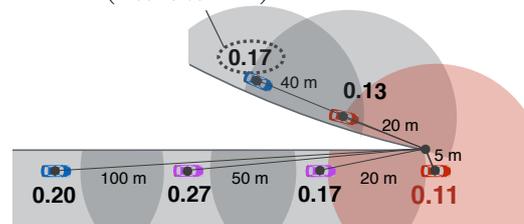


(a) 車群先頭/末尾車両

$$R = R_{max} = 1.00$$

$$S = \max \left(1.00 - \frac{40}{100}, 0.50 \right) = 0.60 \text{ より}$$

$$I = \min \left(\frac{0.10}{1.00 \cdot 0.60}, 1.00 \right)$$



(b) 車群先頭/末尾補助車両

図 5: センサ情報の送信間隔 I の計算例

方で, 優先度が低い車両程, センサ情報の送信間隔が I_{max} を上限として長くなり, その送信頻度が低くなる.

図 5a は, 図 2 中の直線道路にいる車両において, 表 1 のように各値を設定した時における各車両のセンサ情報の送信間隔を示している. 図 2 にて灰色で示した車両より赤色で示した車両の送信頻度の方が高いことが分かる. 一方, 図 5b は, 図 2 中の合流車線付近にいる車両を増やした時の各車両のセンサ情報の送信間隔を示している. こちらも同様に, 図 2 にて赤色で示した合流地点に最も近い車両の送信頻度が他車両と比べて高いことが分かる. つまり, 車両に提案手法を適用することで, 多くの車両がセンサで直接検知できていない領域に関するセンサ情報が優先的に配信される結果となっている.

表 1: 図 5 における設定値

L_{front} [m]	L_{behind} [m]	R_{max}	R_{mid}	R_{min}
100	100	1.00	0.75	0.50
D_{th} [m]	S_{min}	I_{min} [s]	I_{max} [s]	
100	0.5	0.1	1.0	

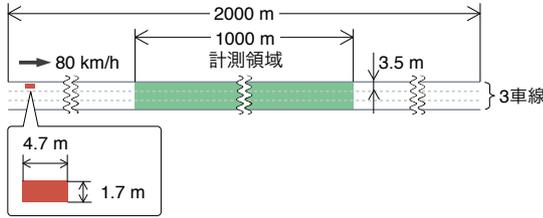


図 6: シミュレーションシナリオ

表 2: シミュレーションパラメータ

Radio	IEEE 802.11p at 5.9 GHz
Bandwidth	10 MHz
Data bitrate	6 Mbps
Propagation model	Free space
Transmission power	20 dBm
Receiver sensitivity threshold	-85 dBm
Carrier sense level	-65 dBm
Packet size	1500 Bytes
LIDAR sensor range	100 m
LIDAR sensor horizontal FoV	360°
Sensing interval	0.1 s
Beacon data expired time	1 s
Simulation time	200 s
Number of runs	1

4. シミュレーション評価

提案手法の性能評価を行うために、提案手法を適用した車両が衝突回避アプリケーションに十分な頻度で位置把握する周辺車両の割合をシミュレーションにより評価した。シミュレーションにはネットワークシミュレータ Scenargie を用いた [21].

4.1 シミュレーションシナリオ

直線 2000m, 3 車線の高速道路に車両を到着率 1200 台/h でランダムに流入させ、時速 80km, 最低車間距離 20m で等速移動させた (図 6). V2V 搭載車両の割合を 25, 50, 75, 100%と変化させた時のシミュレーションを行った。車両サイズは 4.7m × 1.7m とした。シミュレーションは 200s 行い、シミュレーション開始 100s 後から計測を開始した。シミュレーション領域の境界における影響を取り除くため、2000m の道路のうち中央 1000m の区間を計測領域とし、この領域におけるデータのみを計測に用いた。V2V 搭載車両はセンシング範囲が 100m で 360 度位置検知可能な LIDAR を搭載しているものとする。つまり、車両は、自身の中心から半径 100m 以内におり、センサの line-of-sight が車体に遮られている死角にいない車両の位置を検知可能とした。V2V 搭載車両は自身の位置、ID、走行車線の ID、センシング範囲と進行方向に加えて、センサで検知した他車両の位置情報をビーコンに含めてブロードキャストするものとした。また、提案手法を適用した車両は、これらの情報に加えて、3.3.1 節で述べたクラスタにおける相対的な位置関係もビーコンに含めて配信するものとした。その他のシミュレーションパラメータは表 2 にまとめる。

提案手法の性能評価は、Adaptive Traffic Beacon (ATB) [14] と 5, 10, 15Hz の 3 種類の固定の送信頻度でビーコン送信を行う方法の 4 種類を車両に適用した場合を比較して行った。ATB との性能比較を行うため、提案手法と ATB

表 3: 提案手法と ATB の設定値

ATB	Channel quality weighting w_C	2
	Interval weighting w_I	1
	Number of neighbors for $N = 1$	50
	SNR for $S = 1$	50 dB
Proposed method	OL	3
	$L_{\text{front}}/L_{\text{behind}}$	100 m
	R_{max}	1.00
	R_{mid}	0.75
	R_{min}	0.50
Common	S	1
	I_{min}	100 ms
	I_{max}	1 s

を Scenargie に実装し、それぞれのパラメータを表 3 のように設定した。直線の高速道路におけるシミュレーションシナリオを用いたため、提案手法における優先度 S は 1 に設定した。ATB に設定した値の大部分は [14, 22] で用いられた値を使用したが、interval weight は 1 に設定した。ATB はビーコンの送信間隔をチャンネル品質とメッセージの優先度に基づき計算するが、interval weight を 1 にすることで、チャンネル品質のみに基づき送信間隔を計算することになる。1 に設定した理由は、ATB におけるメッセージの優先度は、メッセージを特定の車両もしくは領域まで届けることを想定しており、今回の場合、車両は宛先を指定してメッセージを指定しないためである。

4.2 評価指標

評価指標は [3] で用いられている awareness ratio k_{rel} (認識率) を用いた。車両 i の認識率 $k_{\text{rel},i}$ は、車両 i が V2V 通信や自身のセンサにより位置把握している車両台数を $N_{\text{perception}}$ 、車両 i の通信範囲内にいる車両台数を

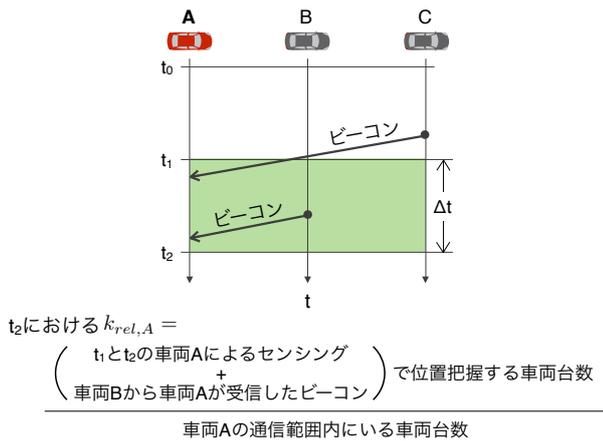


図 7: 認識率の計算

N_{comm_range} とした時, 次の式で求められる.

$$k_{rel,i} = \frac{N_{perception}}{N_{comm_range}} \quad (4)$$

本評価では, 計測開始時刻から毎秒各車両の認識率を計算した. 古い位置情報を認識率の計算に用いないようにするためのパラメータとして Δt を導入し, 認識率の計算時刻から Δt 秒よりも過去に得られた位置情報はその時刻における認識率の計算に用いないものとした. N_{comm_range} 計算時に用いる通信範囲は 300m とした.

図 7 は車両が認識率を計算する方法を簡単に示したものである. 図中において, 各車両がセンシングを行う時刻と認識率の計算時刻が同じであるとする. 車両 A は, 時刻 t_2 における認識率を, 時刻 t_1 と t_2 に自身のセンサで検知した車両の位置情報と車両 B から受信したビーコンに含まれる車両の位置情報を基に計算する. この時, 時刻 t_0 に車両 A がセンサを用いて検知した車両の位置情報は認識率の計算に用いない. また, 車両 A が車両 C から受信したビーコンの送信時刻は時刻 t から Δt 秒前よりも過去であるため, これも認識率の計算に用いない.

4.3 結果

図 8 は, Δt を 1 秒とした時の, 手法毎の通信量に対する全車両の平均認識率の分布を箱ひげ図で示している. 縦軸は全車両の平均認識率, 横軸は計測領域における 1 秒当たりのビーコン送信数を表しており, 赤い線は分布の平均を表している. 図中上部には, 各手法の名前を記載しており, その真下にある箱ひげ図に対応している. PRRS (Positional Relationship and Road Structure based method) は提案手法を指し, 「5Hz 固定」は送信頻度を 5Hz に固定した時, 「10Hz 固定」, 「15Hz 固定」も同様の方法を指している. 少ない通信量で高い平均認識率を実現している手法が ADAS に有効だと言え, 図中の左上端の近くに分布が集まっている手法程, 有効と言える. 一方で, 通信量が多く平均認識率が低い, つまり図中の右下端の近国分布が集まっている

手法程, ADAS に有効でない手法と言える.

V2V 搭載車両の普及率が高くなるにつれて, 認識率の分布が高くなっていることがわかる. 図 8a での認識率の分布はどの手法においても 5 割を下回っており, 分布の平均は 2 割から 3 割程となっている. これは V2V 搭載車両の台数が少ないために, 車両がセンサ情報を含むビーコンを受信する機会が少なくなるためだと考えられる. 図 8b では, 分布の平均が 5 割を超えているものは PRRS と 10Hz 固定, 15Hz 固定の時である. 中でも, PRRS における分布の平均が最も高く, 通信量は 10Hz 固定と比べた場合, 27%少ない. ATB の通信量は他手法と比べて極端に少ないものの, 認識率の分布の平均が 4 割に満たない. 図 8c では, ATB を除いた全手法において分布の平均が 6 割を超え, 7 割前後となっている. 平均が最も高いのは 5Hz 固定の時で, PRRS の平均より 9%高いものの, PRRS の通信量は 5Hz 固定よりも 6%少ない. 図 8b と同様に ATB の通信量は他手法と比べて極端に少ないが, その平均は 5 割である. 図 8d では, ATB を除いた全手法において分布の平均が 9 割を超えている. 中でも PRRS の平均は 10 割であり, 通信量は ATB に次いで少ない. また, 分布の最小値を比べると PRRS の最小値が最も高い値であることがわかる. PRRS における分布が全体的に高い理由は, 車両がセンサで直接検知できない領域におけるセンサ情報が相対的に高い頻度で配信されたためだと考えられる. 以上のことから, 車両に提案手法を適用した際, V2V 搭載車両の普及率が高くなるにつれ, 少ない通信量で高い認識率を実現可能であることがわかった.

5. まとめ

本稿では, 筆者らが提案する車両の相対的な位置と道路構造に応じたセンサ情報の送信頻度制御手法の性能をシミュレーションにより評価した. 提案手法の目的は, 車両密度が高い状況においても, 車両がセンサで直接把握できない障害物の位置を事故回避に十分な頻度と精度で把握可能とすることである. 車車間通信を用いたセンサ情報の交換による周辺の交通状況把握である collective perception は, 車両がセンサで直接検知できない障害物の位置を把握可能となるため, 安全運転支援に有用である. しかしながら, 車両密度が高い時, 送信待ち遅延の増加や隠れ端末問題によるパケットの衝突により安定したセンサ情報の交換が困難となる.

提案手法では, 車両の相対的な位置関係や特定の道路における位置に応じて特定の車両のセンサ情報配信に係る優先度が高くなるように制御し, 結果的に, その一帯にいる車両らが高い精度で位置把握できていない近接の障害物に関するセンサ情報が高い頻度で送信されるような制御を行う. 本稿では, 車両に提案手法を適用した際の周辺車両の認識率を, 車車間通信機能の搭載率を変えたシミュレー

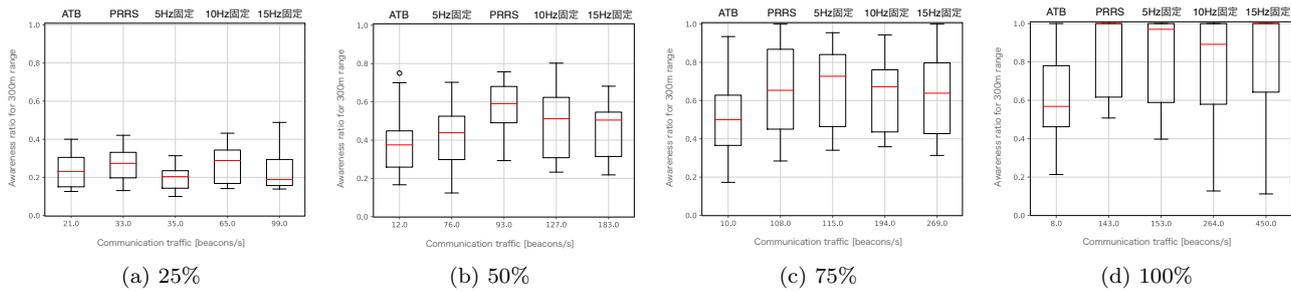


図 8: V2V 搭載車両の割合毎の通信量に対する平均認識率の分布

ションにより評価した。その結果、車両に提案手法を適用した際、V2V 搭載車両の普及率が高くなるにつれ、少ない通信量で高い認識率を実現可能であることがわかった。今後の課題として、交差点における優先度算出方法の追加、合流車線や交差点のシナリオにおける提案手法の性能評価が挙げられる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金課題番号 15H02689 の助成による。

参考文献

- [1] Toyota Motor Sales, “Toyota Safety Sense,” <https://www.toyota.com/safety-sense/animation/pcs>, (Accessed: Feb. 2, 2018).
- [2] H. Hartenstein and K. Laberteaux, “VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies,” Wiley Online Library, Feb. 2010.
- [3] H.-J. Günther, O. Trauer and L. Wolf, “The Potential of Collective Perception in Vehicular Ad-hoc Networks,” in *14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, IEEE, Dec. 2015.
- [4] National Highway Traffic Safety Administration, “Federal Motor Vehicle Safety Standards; V2V Communications,” Federal Register, Vol. 82, No. 8, pp. 3854–4019, Jan. 2017.
- [5] European Telecommunications Standards Institute, “Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5GHz frequency band,” ETSI EN 302 663 V1.2.0, Nov. 2012.
- [6] Association of Radio Industries and Businesses, “700 MHz Band Intelligent Transport Systems,” ARIB STD-T109 v1.3, Jul. 2017.
- [7] IEEE, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” IEEE Computer Society, Std 802.11-2012, Mar. 2012.
- [8] M. Torrent-Moreno, D. Jiang, and H. Hartenstein, “Broadcast Reception Rates and Effects of Priority Access in 802.11-based Vehicular Ad-hoc Networks,” in *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*, ACM, Oct. 2004, pp. 10–18.
- [9] National Highway Traffic Safety Administration, “Vehicle Safety Communications Project: Final Report,” Technical Report DOT HS 810 591, Apr. 2006.
- [10] K. Furukawa, M. Takai, and S. Ishihara, “Controlling Sensing Information Dissemination for Collective Per-

- ception in VANET,” The 16th ITS Asia-pacific Forum, Fukuoka, Japan, May 2018.
- [11] A. Rauch, F. Klanner, R. Raschhofer, and K. Dietmayer, “Car2X-Based Perception in a High-Level Fusion Architecture for Cooperative Perception System,” in *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, pp. 270–275, June. 2012.
- [12] H.-J. Günther, O. Trauer, B. Mennenga, and L. Wolf, “Realizing Collective Perception in a Vehicle,” in *Proceedings of the 2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Columbus, Ohio, USA, Dec. 2016.
- [13] K. Garlich, M. Wegner and L. C. Wolf, “Realizing Collective Perception in the Artery Simulation Framework,” in *Proceedings of the 2018 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Columbus, Ohio, USA, Dec. 2018.
- [14] C. Sommer, O. K. Tonguz and F. Dressler, “Traffic Information Systems: Efficient Message Dissemination via Adaptive Beaconing,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 5, pp. 173–179, May 2011.
- [15] European Telecommunications Standards Institute, “Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz range; Access layer part,” ETSI, TS 102 687 V1.1.1, Jul. 2011.
- [16] H.-J. Günther, R. Riebl, L. Wolf and C. Facchi, “Collective Perception and Decentralized Congestion Control in Vehicular Ad-hoc Networks,” in *Proceedings of the 2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Columbus, Ohio, USA, Dec. 2016.
- [17] M. Torrent-Moreno, P. Santi, and H. Hartenstein, “Distributed Fair Transmit Power Adjustment for Vehicular Ad Hoc Networks,” *IEEE SECON2006*, pp.39–48, 2006.
- [18] VICS とは, “VICS センター,” <https://www.vics.or.jp/know/about/index.html>, (Accessed: Feb. 2, 2018).
- [19] K. Massow, B. Kwella, N. Pfeifer, F. Hausler, J. Pontow, I. Radusch, J.Hipp, F. Dolitzscher, and M. Haueis, “Deriving HD Maps for Highly Automated Driving from Vehicular Probe Data,” *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 1745–1752, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 2016.
- [20] 高田広章, 佐藤健哉, “ダイナミックマップ,” *システム/制御/情報*, vol. 60, no. 11, pp. 457–462, 2016.
- [21] Space-Time Engineering, <https://www.spacetime-eng.com/en/products>, (Accessed: Feb. 2, 2018).
- [22] F. Dressler, F. Klingler, C. Sommer and R. Cohen, “Not All VANET Broadcasts Are the Same: Context-Aware Class Based Broadcast,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, no. 1, pp. 17–30, Feb. 2018.