

狭域交通情報共有のための車車間通信における 車両位置情報に基づく効率的な中継転送方式の提案

吉川 潤¹ 湯 素華^{1,a)} 小花 貞夫¹

受付日 2015年4月7日, 採録日 2015年10月2日

概要: ITS (高度道路交通システム) では, 700 MHz 帯車車間通信により, お互いの位置・速度情報などを頻繁に交換して衝突を防止するシステムの研究開発が行われてきているが, 今後は, 安全運転だけでなく, エコドライブや運転の快適性や利便性の向上を図る 5.8 GHz 帯車車間通信の実現も強く期待される. 本論文では, ドライバが道路や交通の状況に応じて走行できるように, 5.8 GHz 帯車車間通信により渋滞や事故などの狭域な交通情報を周辺車両で効率的に共有させることを目的として, 中継車両選択における従来方式の問題点であったほぼ同位置にある複数車両からの同時転送による衝突を防止するための中継転送方式を提案する. 提案方式では, 700 MHz 帯車車間通信により共有される位置情報から送信車両との距離の明確な順序付けを行い, 遠い車両を待ち時間の少ない Slot に割り当てることにより, MAC (Media Access Control) 層のコンテンション機構に基づいて効率的に中継車両を選択する. シミュレーション評価により提案方式が既存方式と比べて, 交通情報の拡散率を 33%向上させ, また遅延時間を 55%低減できることを確認した.

キーワード: 車車間通信, 狭域交通情報共有, 中継選択, 位置情報に基づく順序付け

Location-based Relay Selection for Efficient Diffusion of Local Traffic Information in Vehicular Communications

JUN YOSHIKAWA¹ SUHUA TANG^{1,a)} SADA OOBANA¹

Received: April 7, 2015, Accepted: October 2, 2015

Abstract: In ITS (Intelligent Transport Systems), inter-vehicle communications (IVCs) in the 700 MHz band are used to frequently exchange position and speed information between vehicles to avoid collision accidents. Besides this support system for safe driving, new functions like eco-driving, and comfort and convenience of driving by leveraging the 5.8 GHz band, are also strongly expected. Relay selection suggested for the latter in previous works, however, faces the packet collision problem caused by the simultaneous forward transmissions from relay vehicles with almost the same distance. To solve this problem, this paper aims at efficient, local diffusion of congestion and accident information in the 5.8 GHz band so that drivers can learn road and traffic conditions in time. Specifically, via IVCs in the 700 MHz band, vehicles learn the same local map of nearby vehicles. On this basis, potential relay vehicles are sorted according to their distances from the sending vehicle, and farther vehicles are assigned slots with shorter delay. By the MAC (Media Access Control) layer contention mechanism, the farthest and available vehicle is selected as the relay. Extensive simulation evaluations confirm that the proposed scheme improves the reachability by up to 33%, and decreases the latency by up to 55%, compared with state-of-the-art methods.

Keywords: inter-vehicle communications, local diffusion of traffic information, relay selection, location-based ordering

¹ 電気通信大学大学院情報理工学研究所
Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182–8585, Japan

^{a)} shtang@uec.ac.jp

1. はじめに

ITS (高度道路交通システム) では, 700 MHz 帯の車車間通信により, お互いの位置・速度情報などを頻繁に交換

して衝突を防止するシステムの研究開発 [1], [2] が行われてきているが、今後は、安全運転だけでなく、エコドライブや運転の快適性・利便性の向上を図る、5.8 GHz 帯の車車間通信システムの実現も強く期待される。

5.8 GHz 帯での通信距離は短いため、渋滞や道路情報などを遠方の車両にブロードキャストで通知する際には、中継通信が必要となる。しかしすべての車両が中継すると、broadcast storm により通信効率が劣化するため、パケットを最初に受信したときに限り、周囲の車両に中継する方式が基本である。その効率をさらに向上させるために、一定の待ち時間を設け、その間に同じパケットを数回受信すると中継送信をやめる counter-based scheme [4] や、待ち時間を転送距離に対応付けて送信車両から遠い車両を優先的に選択する distance-based broadcast [5] などの方式が提案されている。特に、後者の場合中継回数を低減させることができる。一般に、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) に従う MAC (Media Access Control) 層では、コンテンションウィンドウにおけるバックオフの単位 (Slot と呼ぶ) で待ち時間が決められ、また、Slot の数が限られているので、最大通信距離を離散化して Slot に対応付ける。そのため、車両密度の高い環境では、複数の車両が同じ Slot に割当てられることもあり、それらの同時中継送信による衝突が通信の信頼性に影響を及ぼす。

本論文では、ドライバが道路や交通の状況に応じて円滑かつ快適に走行できるように、5.8 GHz 帯での車車間通信により渋滞や事故などの狭域の交通情報を周辺車両で効率的に共有させるための車両による中継転送方式を提案する。提案方式では、複数車両の同時中継送信の衝突問題を回避するために、700 MHz の車車間通信によって周辺車両間で共有される各車両の位置情報から、送信車両との距離の明確な順序付けを行い、遠い車両を待ち時間の少ない Slot に割り当てることにより、MAC 層のコンテンション機構に基づいて効率的に中継車両を選択する。

シミュレーション評価により提案方式を評価し、既存方式と比べて、交通情報の拡散率を 33% 向上させ、また遅延時間を 55% 低減できることを確認した。

2. 交通情報共有の概要とその課題

狭域交通情報共有の概要を図 1 に示す。狭域交通情報共有とは、車車間通信を用いて車両が走行中に捕捉した様々な交通事象に関する情報を共有することで円滑で快適な運転を実現する仕組みである。共有する情報は事故・渋滞情報や緊急車両情報、路面情報、急制動情報、ドライバリクエストなどを想定し、情報の種類や位置データなどからなる小容量なデータを中心とする。またマルチホップ中継を行うことで遠くの車両に情報を伝達する。

車車間通信を利用して交通情報の共有を目的とする研

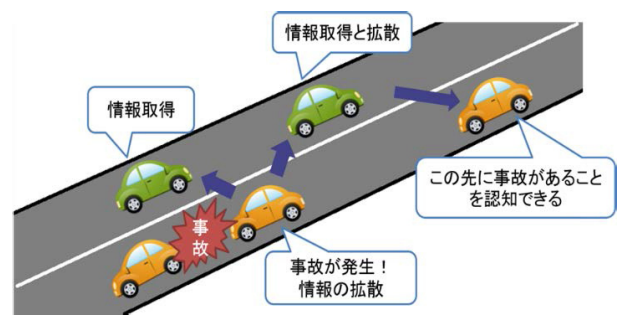


図 1 交通情報共有方式の概要

Fig. 1 Overview of traffic information exchange.

究 [1], [2] は数多く存在するが、車両の急制動、安全運転支援や渋滞情報などの運転の快適性を向上させるための通信では、通信の対象を特定の車両ではなく、周囲の不特定多数の車両へ伝達する必要がある。さらに各車両が高速に移動することを考えると、モビリティに適したブロードキャストによる情報の拡散が望ましいと考えられる。ブロードキャストによる情報の拡散を実現するうえでの課題は、遠方まで情報を伝達させる際にどの車両に中継させるかである。

2.1 既存の中継車両選択方式

移動体アドホックネットワークでのブロードキャスト配信のための中継ノード (車両) の選択方式 [1], [2], [3] について以下にまとめる。

(a) Flooding

各ノードは、パケットを最初に受け取ったときに、周囲のノードに中継を行う。

(b) Probabilistic Scheme [4]

ブロードキャストによるパケットを最初に受信したときに確率 P によって中継を行うか否かを判定する。 $P=1$ の場合、Flooding と同様の振舞いになる。

また、この基本方式を改善するために、ランダムな送信待ち時間を設定し、パケットの中継送信を開始する前に他のノードから同じパケットを n 回 (システムパラメータ) 受信する際に送信をキャンセルする Counter-Based Scheme [4] も提案されている。MAC 層での送信待ち時間はバックオフ時間と呼ばれ、式 (1) で示されるように DIFS (Distributed coordination function Interframe Space) と呼ばれる固定長の待ち時間とコンテンションウィンドウ (CW) の範囲内で選択されるランダム値 \times スロットタイム (Slot) により決定される。

$$\text{WaitTime(待ち時間)} = \text{DIFS} + \text{Random (CW)} \times \text{Slot} \quad (1)$$

(c) Distance-Based Broadcast [4], [5], [6]

車車間通信ネットワークにおける距離ベースのマルチホップブロードキャストの中継車両選択方式であり、パ

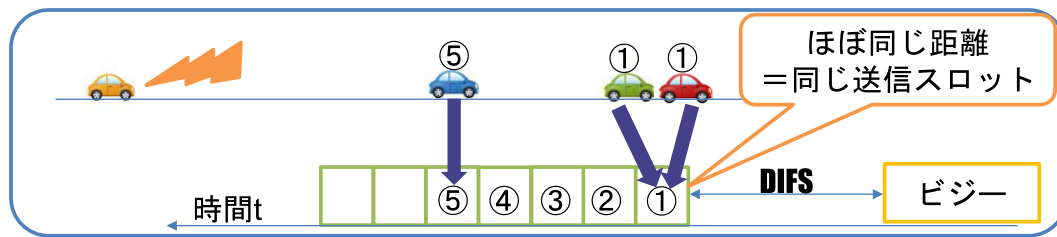


図 2 Distance Based Broadcast による中継車両選択
 Fig. 2 Relay vehicle selection in the distance based broadcast scheme.

ケットを受信してから中継するまでに自車両と送信車両の距離に応じて変化する待ち時間を用いる。図 2 に示すように、MAC 層で中継送信する前に、 N 個の Slot を設け、自車両が割り当てられる Slot において、他の車両が中継していなければ中継する。文献 [4] では自車両と送信車両間の距離によるメッセージの到達範囲の増加をメトリックとし、増加が大きいほど、待ち時間が小さくするように Slot を割り当てる。また、周辺車両の位置が分かるときには、到達範囲をより正確に算出できる。文献 [5] では、各車両は他車両の位置を認識しないため、最大通信距離を均等に N 分割し、距離の降順でそれを Slot に対応付ける。また、待ち時間を短縮するために、文献 [6] では待ち時間を Slot 単位ではなく任意の粒度で設定できることを前提として距離の log 値から待ち時間を決める。これらの方式では、自車両と送信車両の距離が遠ければ送信待ち時間は短くなり、優先的に送信できる。もし、送信待ち中に同一の情報を受信した場合は他の車両が中継したことを認知し、送信をキャンセルして冗長な通信を抑制する。

(d) Neighbor Knowledge-Based Broadcast [7], [8]

文献 [7] は周辺車両の間で周期的に位置情報などを交換することにより、車両の密度を把握し、それを基に、ブロードキャストパケットの再送タイミングなどを動的に調整する方式である。文献 [8] は周辺車両間のやりとりにより得られた位置情報を基に、MAC 層より上位の層で、パケットの送信時間に相当する幅で SLOT を割り当て、送信車両からの距離順で各 SLOT における車両の台数（密度）を正確に制御する。

(e) Location-Based Broadcast [9]

各車両の絶対位置を基にスペースを grid 化して、車両の送信タイミングをずらしてブロードキャスト送信の衝突率を低減させる。

(f) Traffic-Based Broadcast [10], [11]

バスなどのルートが決まっている車両のルート情報を利用して中継車両を選択する [10]、または、車群で行進する際、車両間のソーシャルな関係 [11] を基に最適な中継車両を選択する方式である。

その他、より多くの車両に配信するように、電子地図を用いて交差道路上の車両を優先的に中継させる方式 [12]、信頼性を向上させるために ACK を利用する方式 [12]、中

継する際の衝突を低減させるために、Vehicular Backbone Network を構築して中継を一部分の車両に絞る方式 [14] や複数のパケットを 1 つにまとめて送信する方式 [15] が提案されている。また、緊急時の配信を優先させるために、IEEE 802.11e [16] に基づく優先度制御方式 [17], [18] も提案されている。

2.2 先行研究の問題点

Counter-Based Scheme [4] では、ランダムな待ち時間の設定により、中継すべきノード（車両）が単一に絞られずに冗長な通信が行われたり、また送信車から最も遠い車両が選択されなかったりする可能性があり遠方の車両へ情報を伝達する際に中継回数が増え、非効率な中継が行われるという問題点がある。

Distance-Based Broadcast [5] では、各車両は他車両の位置を認識していないため、自車両がいる距離範囲に相当する Slot において、他の車両が中継していなければ中継する。都市部での高密度な交通環境で複数車線が存在する場合などでほぼ同位置（送信車両から同一距離範囲）に複数の車両がいる場合、それぞれが同じ Slot で同時に中継するパケットどうしが衝突し、配信効率を低下させるという問題がある。文献 [6] では待ち時間が任意の粒度で設定できることを前提として距離の log 値から短い待ち時間を決めるが、実現が困難である*1という欠点がある。

これらの問題を解決するために、本論文では距離範囲ではなく別途得られる周辺車両の位置情報（neighbor knowledge）から求めた送信車両と各中継可能車両との距離から中継車両の順番付けを行う中継転送方式を提案し、より効率的で低遅延な狭域交通情報の拡散を実現する。

文献 [7] では、Neighbor Knowledge を用いて、高密度と低密度の場合それぞれ異なる送信方式を使用してパケット到達率を向上させようとしているが、どうやって切り替えるかは課題として残されている。これに対して提案方式では、周囲の車両に対して、送信車両から距離の遠い先頭の車両を選択するので、車両の密度による影響は少ないと考

*1 CSMA で送信する際、まず受信状態でキャリアセンスすることが必要である。ハードウェアの制限を受け、受信状態から送信状態に切り替える際時間がかかる。切り替える時間より短い待ち時間を設定できないため、IEEE 802.11 などの MAC プロトコルでは、Slot 単位でキャリアセンスを行う。

えられる。文献 [8] では、パケットの送信時間の幅に相当する SLOT を割り当て、距離の順番で各 SLOT における車両台数を正確に制御できるが、MAC 層より上位層での実装であるため、先頭の車両がパケットを受信していない、またはチャンネルが BUSY であり送信できない場合に、後ろの車両が代わり送信すると大きい送信遅延が発生しうる。また、その性能は通信距離の推測の精度により大きく変動する。

Location-Based Broadcast 方式 [9] は、各車両が周辺車両に対する周期的な位置情報のブロードキャスト送信には有効であるが、中継送信にはそのまま適用することはできない。また、車両の絶対位置精度に依存するため、位置精度が限られている都市部ではその性能が劣化する。それに対して、提案方式は、誤差が含まれる位置情報を使用しても、その位置情報がすべての車両に共有される限り問題なく動作する。

文献 [10], [11], [14] は、固定のブロードキャスト経路を作成するには有効であるが、提案方式のように車両の位置や電波の受信状況に応じて中継車両を動的に選択しなければならない場合には適さない。また、提案方式はパケットごとに中継し、サービス差別化を考慮しないが、パケットアグリゲーション [15] やトラフィックのサービス差別化 [17], [18] の併用も可能であり、今後の課題とする。

3. 位置情報に基づく中継車両の順序付けによる中継転送方式

3.1 概要

前章の問題点を解決する方式として、安全運転支援システムでの 700 MHz 帯の電波を利用して交換・取得される周囲の車両の位置、速度、移動方向の情報に基づく順序付けによる中継転送方式を提案する。また、本論文で扱う交通情報は、ITS 利用が許可されている 5.8 GHz 帯の電波を使って通信するものとする。各車両は GPS 受信機、電子地図、700 MHz 帯と 5.8 GHz 帯の通信装置が搭載され、GPS 受信機によって自車両の位置情報を取得し、700 MHz 帯の車車間通信を介して周辺車両と交換し合い、さらに地図上で、各車両がどの道路上に位置するかを検知できるものとする。

5.8 GHz 帯の車車間通信においては、各車両はパケットを受信する際、送信車両からの自車両および周辺車両の距離を算出する。あらかじめ設定した最大通信距離以下のすべての車両に対して、送信車両からの距離の降順（遠い順）で車両をソートし、順位付けを行う。各車両は自車両の順位を中継優先度として自律的に決定し、その値は小さいほど優先度が高い。MAC 層では Slot を設ける。各車両は、自車両の中継優先度に相当する Slot になる際に、チャンネルがまだ IDLE であれば、パケットの中継送信を開始する。それより優先度の低い車両は、チャンネル BUSY を検知し、

表 1 位置情報パケットの構造

Table 1 Structure of position information packet.

項目	説明
NodeId	車両番号
NodePositionX	車両の X 座標
NodePositionY	車両の Y 座標
Speed	車両の速度
DirectionOfMove	車両の進行方向
TimeOfPosition	測位時刻

自車両のすでにスケジュール済みの中継送信を延期する。したがって、最大通信距離以下の一番遠い車両のみが最初の中継車両として選択され、中継効率を向上させるとともに、Distance-Based Broadcast 方式における中継車両どうしの送信衝突問題を回避できる。また、中継送信を延期した車両は、前方の車両からの中継送信を傍受できた場合には、その中継送信をとりやめる。そうでなければ、一定時間を待ってから中継を試みる。以下、これを繰り返す。

3.2 提案方式の詳細

3.2.1 車両相互の車両位置把握

安全運転支援システムでは、100 ms ごとに周囲の車両と位置、速度、移動方向の情報および車両 ID を交換することとしている。都市部で車両が密集しても、路側建物の遮蔽の影響で通信は主に道路に沿って行われ、同じ通信範囲における車両台数が限られるため、パケットの衝突による位置情報の到達率の劣化は発生しない。

各車両は送信タイミングが異なるが、その位置情報は同じ時刻で GPS 受信機によって算出される*2。提案方式では各車両の最新の位置情報ではなく、同じ時刻での各車両の位置を基に中継優先度を算出する。車両位置を相互に交換するパケットには、ARIB 標準 STD T109 [19] に準拠する表 1 の情報が含まれるものとする。

3.2.2 中継車両の選択（基本的な選択方法）

中継が必要な情報を受け取った車両は受信したパケットから送信車の位置情報を取得し、自車両との距離を計算する。その後、周辺車両と送信車両の距離を算出し、自車両の中継優先度を決定する。パケットを受信したすべての車両が同一位置情報に基づいて処理をすることにより周辺車両間で共通の中継優先度が共有される。中継優先度が 1 のとき最も優先され、優先度の最大値は後述の PRIORITY_MAX として動的に設定・変更する。図 2 に示す、離散化した距離範囲に相当する待ち時間により中継優先度を算出する既存方式とは異なり、提案方式では、図 3 で示すように送信車両との距離を離散化せずに求め

*2 GPS 受信機の測位時刻が異なる場合、各車両は周辺車両から受信した位置・速度・測位時刻情報を基に、同じ時刻での周辺車両の位置情報を求める。

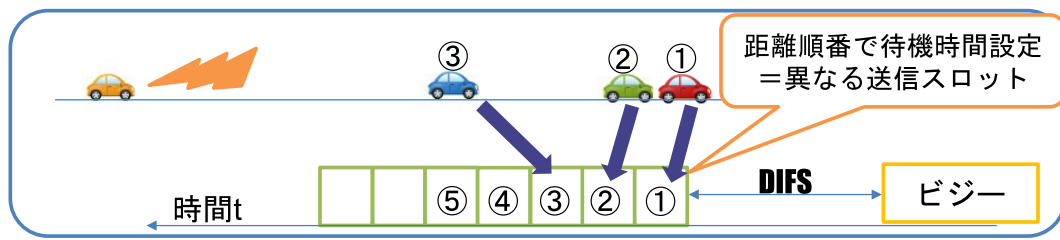


図 3 提案方式による中継車両選択
Fig. 3 Relay vehicle selection in the proposed scheme.

た順番により決定する。算出した中継優先度に応じて、各車両の送信待ち時間（後述）を設定して中継タイミングに差をつけることにより、既存方式において複数の中継車両による通信が衝突していた問題を回避可能とする。中継優先度は送信者から最も遠方にある車両が最も高く、等距離に他の車両が存在する場合は車両 ID を比較し、ID の小さい車両を優先するものとする。また、各車両は、中継前に他の車両の中継を確認した場合には中継をキャンセルして冗長パケットの伝搬を抑制する。

また、位置情報は 700 MHz 帯で交換されるため、狭域交通情報を共有する 5.8 GHz 帯よりも周波数が低い分遠くまで電波が到達することから、各車両が取得する位置情報に基づきすべての車両に中継優先度を付与した場合、5.8 GHz 帯による交通情報の通信では電波が到達せずそれにより不要な順位づけが行われて無駄な待ち時間が発生する可能性がある。そのため、想定される 5.8 GHz での最大通信距離内（たとえば 380 m と設定）でのみ中継優先度を付与することで適切な中継車両の選択制御を行うこととする。

(1) 送信待ち時間

送信待ち時間は IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function) を基に実装する。MAC 層では、チャンネルをアクセスする際、バックオフタイマを設け、Slot ごとにチャンネルが IDLE であるかどうかを検知し、IDLE であれば、タイマを 1 ずつ減らし、タイマが 0 になったらただちに送信を開始する。衝突を減らすためにタイマに通常ランダム値を設定するが、提案方式では、それを中継優先度 (RelayPriority) に設定し、送信待ち時間は、式 (2) により決定する。

$$\text{WaitTime(待ち時間)} = \text{DIFS} + \text{RelayPriority} \times \text{Slot} \quad (2)$$

(2) 交差道路に存在する車両に対する中継優先度割当て

交差道路に存在する車両の中継は車両の進行方向とは異なる方向への情報拡散に有効である。このため情報を受信した車両が送信車とは異なる方向に存在する場合、直進方向の車両へ割り当てられる中継優先度とは重複しない中継優先度を割り当てて道路別に中継送信を行う。交差道路上では優先度を低く設定し、直進道路（反対方向を含む）上の中継送信を優先的に行う。また交差道路上の車両は直進

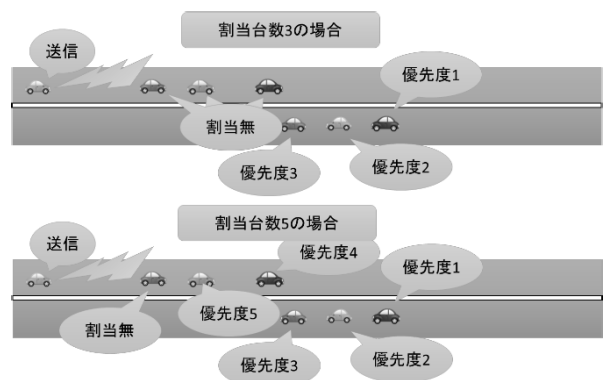


図 4 中継優先度の割当て例
Fig. 4 An example of assigning relay priority.

道路上の中継送信を傍受しても、中継方向が異なるため中継を行うこととし、拡散範囲を広げる。

(3) 中継優先度の割当て車両台数の動的変更

中継優先度を設定する最大の割当て台数を PRIORITY_MAX と表現する。中継優先度は、情報を受信したすべての車両に付与するわけではなく、通信状況によって変化する PRIORITY_MAX の値の台数に付与する。PRIORITY_MAX が 3 と 5 のときの割当て例を図 4 に示す。

割当て台数を少なくした場合、送信車から遠い車両のみが中継することで効率的な情報の拡散が可能であるが、その車両が隠れ端末からの影響などにより情報を受信できなかった場合、それ以上情報の拡散が行われないという問題点がある。一方、割当て台数を多くした場合、送信車に近い車両は通信の衝突などにより、遠い車両の中継を認識できなかった場合、不要な中継を行うという問題がある。このため、割当て台数を動的に調整することが必要であり、通信トラヒック閑散時には中継優先度割当て台数を多めに設定し、また、通信トラヒック混雑時には中継優先度割当て台数を少なめに設定する。また、予備シミュレーションにより通信トラヒックを変化させる場合の最適な中継優先度割当て台数をテーブルとして用意し、評価中に使用することとする。

提案方式における処理フローを図 5 に示す。既存の Distance-Based Broadcast 方式では、各車両は送信車両から自車両までの距離のみを計算するが、提案方式では、各車両は自車両だけでなく、周辺車両と送信車両の間の距離

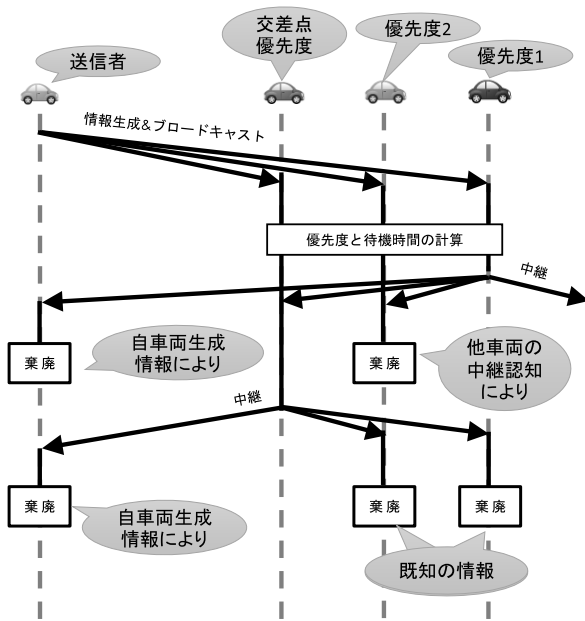


図 5 提案方式の処理フロー

Fig. 5 Packet processing flowchart of the proposed scheme.

表 2 パケットの構造

Table 2 Packet structure.

項目	説明
BroadcastTime	情報を生成した時間
SourceNodeId	情報生成した車両番号
SourceNodePositionX	情報を生成した車両の X 座標
SourceNodePositionY	情報を生成した車両の Y 座標
maxHopCount	最大ホップ数
PRIORITY_MAX	中継優先度の最大値
RelayNodeId	中継車両の車両番号
EventData	イベントデータ

も計算する。それを基に、各車両は自律的に自車両の中継優先度と Slot を決定する。また、交差点道路へ配信するために道路別に中継車両を選択することが必要である。この場合、それぞれの中継送信の衝突を回避するため、中継優先度が重ならないように決定する。また、PRIORITY_MAX などの制御情報は表 2 に示すパケットに含めて送信とする。

4. シミュレーション評価

4.1 概要

提案方式の有効性をシミュレーションにより検証するため、提案方式と 2.1 節で述べた比較方式を汎用ネットワークシミュレータ Scenargie [20] 上に実装した。Counter-Based Scheme [4] は、broadcast プロトコルのテストベッド評価にはよく使用されており、Distance-Based Broadcast [5] は車両間の距離から待ち時間を決める情報配信に使用する代表的なプロトコルである。また、双方とも、MAC 層での Slot に基づいて送信待ち時間を決める実装上で現実的な

方式である。以上により、それらの既存方式を評価対象とした。

提案方式と比較方式の評価項目は、情報生成間隔を変化させたときの、1) 情報拡散率 (情報受信車両数/全車両数、文献 [4] における reachability と同じ)、2) 総送信回数、3) エラーレート (弱電力や衝突による MAC 層フレーム破損数/(フレーム破損数+正常に受信できたフレーム数))、4) 平均遅延時間とする。また、提案方式における中継優先度の割当て車両台数の動的変更機能と交差点道路車両への中継優先度割当て機能の評価、ならびに 700 MHz 帯を利用した位置情報交換の正確性評価も行った。評価では、各評価項目の平均値を使用する。

4.1.1 比較方式の実装

(1) Counter-Based Scheme (比較方式 1)

各車両は周期的に情報を生成し発信する。情報を受信した車両は、ランダムな送信待ち時間の終了後に中継・送信する。送信待ち時間は以下の式 (3) による。

$$\text{WaitTime} = \text{Random}(0.1, 0.5) \text{ sec} \quad (3)$$

送信待ち時間に同一のパケットを n 回受信することで送信をキャンセルする。ここでは、 $n=1$ とする。

(2) Distance-Based Broadcast (比較方式 2)

式 (4) により、通信可能距離 (MAXRANGE) を均等に分割する数 (SPLITNUM) で除し、各距離範囲の長さを決め、さらに送信車両と自車両の距離 (Distance) を基に、自車両が何番目 (MySector) の距離範囲に存在するかを算出し、それを基に、式 (5) により待ち時間 (WaitTime) を設定する。なお、ここでは、 $\text{SPLITNUM} = 100$, $\text{MAXRANGE} = 380 \text{ m}$ とする。

$$\text{MySector} = \left\lfloor \frac{\text{MAXRANGE} - \text{Distance}}{\text{MAXRANGE}/\text{SPLITNUM}} \right\rfloor \quad (4)$$

$$\text{WaitTime} = \frac{0.4 \text{ sec}}{\text{SPLITNUM}} \times \text{MySector} \quad (5)$$

4.2 シミュレーション条件

交差点間隔 400 m で 4×4 のグリッド状の道路マップ*3に 500 台の車両を配置する。道路以外の部分には建物が存在し、各交差点には信号機を設置する。各車両はランダムに決定された初期位置からランダムに移動し、一定間隔で情報を生成する。電波伝搬モデルは建物による電波の遮蔽を考慮する ITU-R P.1411 の標準に従う。主なシミュレーションの設定値を表 3 に示す。平均的な車両の密度はそれほど高くないが、交差点での信号を模擬しているため、交差点の前で信号待ちの車両が密に並び、既存方式では中継送信の頻繁な衝突によって性能が劣化するが、提案方式では中継車両どうしの送信衝突を回避できる。

*3 シミュレーションでは、平面のみを考慮しているが、提案方式は、立体構造の道路の上と下を車両が併走するケースへも適用できる。

表 3 シミュレーション設定値
Table 3 Simulation parameters.

項目	値
通信方式	IEEE 802.11p
伝送速度	3Mbps
周波数帯	5.8GHz
送信出力	20dBm(100mW)※約 380m 到達
電波伝搬モデル	ITU-R P.1411
パケットサイズ	128byte - 512byte
最大ホップ数	100
情報生成間隔	0.5s/台 - 8s/台
評価エリア	1.6km x 1.6km
交差点間隔	400m
信号の有無	有(全ての交差点)
車線数	2 (片側)
車両位置	ランダム
車両台数	500 台
車両長	5m
車両速度	30km/h - 60km/h
Slot	13μs
PRIORITY_MAX	20~100, 動的に選択
シミュレーション時間	120s
試行回数	30

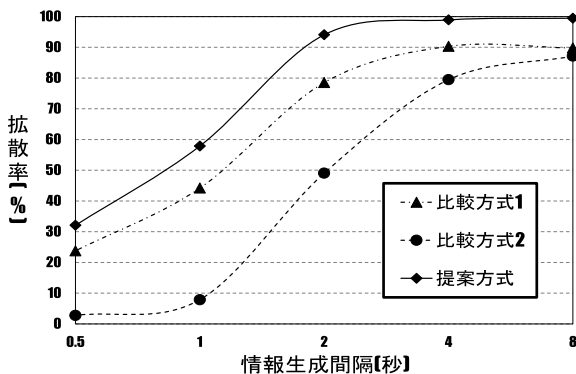


図 6 情報生成間隔と拡散率

Fig. 6 Diffusion rate under different packet generation intervals.

4.3 情報拡散率に関する評価と考察

情報生成間隔を 8s から 0.5s まで変化させたときの平均拡散率を図 6 に示す。すべての情報生成間隔で提案方式の拡散率が最も高く、特に情報生成間隔が 0.5s のときには、比較方式 1 (Counter-Based Scheme) より拡散率が 24%から 32%に向上している (改善幅 33%)。また比較方式 2 (Distance-Based Broadcast) と比べて、拡散率が 2.7%から 32%に向上している。シミュレーションでは、信号により交差点付近に車両が多く存在するため、比較方式 2 において通信が衝突しやすいことが原因で、比較方式 2 が最も悪い結果になったと考えられる。

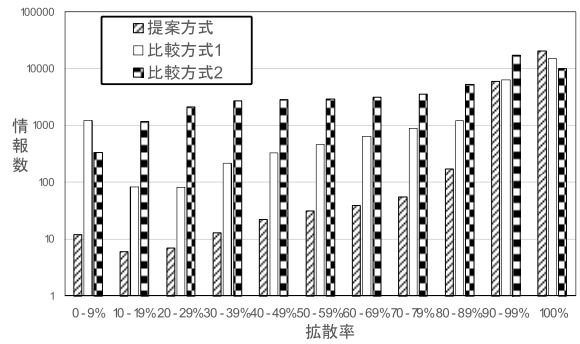


図 7 方式別の拡散率分布

Fig. 7 Distribution of diffusion rate under different schemes.

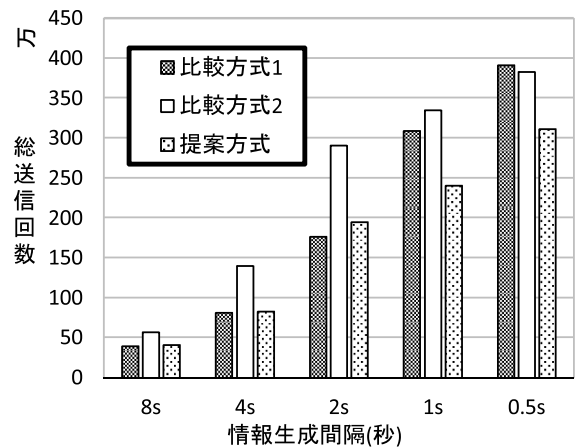


図 8 情報生成間隔と送信回数

Fig. 8 Transmission count under different packet generation intervals.

また、情報生成間隔 8s のときの方式ごとの拡散率分布を図 7 に示す。縦軸の情報数は生成された情報の数である。提案方式では拡散率 100%の情報数が最も多い結果となっており、提案方式における最遠車両の中継ならびに中継車両どうしのパケット衝突の回避により多くの車両へ情報を拡散できているものと考えられる。

4.4 通信回数と信頼性に関する評価と考察

図 8 に情報生成間隔を変化させたときの総送信回数を示す。8s から 2s の間隔では提案方式と比較方式 1 (Counter-Based Scheme) の総送信回数は同等であるが、1s, 0.5s 間隔では提案方式は総送信回数を最大 20%削減できている。すべての情報生成間隔で比較方式 2 の送信回数が多く、情報生成間隔が 1s のときには提案方式は最大 28%削減している。

8s から 4s, 4s から 2s の間隔で情報を生成する場合、時間あたりで倍の情報生成されることより同等の拡散率を維持するためには、総送信回数も約 2 倍になるはずである。しかし 2s から 1s および 1s から 0.5s では総送信回数の増加率は鈍化しており、通信トラフィックがチャネルの容量を超え、送信しきれない状況であると考えられる。

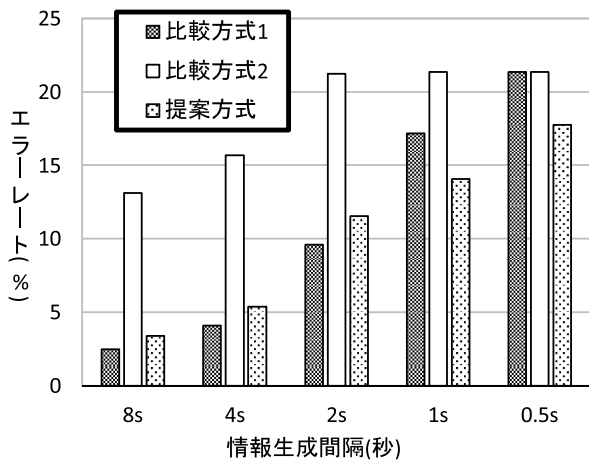


図 9 情報生成間隔とエラーレート

Fig. 9 Error rate under different packet generation intervals.

図 6 と図 8 をあわせ見ると、比較方式 1 および比較方式 2 では、提案方式よりも送信回数が多いにもかかわらず拡散率が向上していない。この結果から、提案方式では 1 回の送信でより多くの車両が情報を取得できていることが分かる。それに対して、比較方式 1 および比較方式 2 では同一の情報が複数回中継されていることやパケットの衝突によって効率的な情報拡散が行われていないものと考えられる。

図 9 に情報生成間隔とエラーレートの関係を示す。図より、情報生成間隔 1s, 0.5s のとき (高トラフィックのとき)、提案方式ではエラーレートが比較方式 1 (Counter-Based Scheme) および比較方式 2 (Distance-Based Broadcast) よりも低い値で抑えられ信頼性の高い通信ができていていることが分かる。

また比較方式 2 (Distance-Based Broadcast) では、信号待ちの車両など近くの位置に複数の車両が存在する場合に、中継送信が高い確率で衝突するためエラーレートが提案方式および比較方式 1 (Counter-Based Scheme) よりも高い値を示していると考えられる。

4.5 遅延時間に関する評価と考察

図 10 に情報生成間隔を変化させたときの平均遅延時間を示す。提案方式では情報生成間隔 2s のときに比較方式 1 (Counter-Based Scheme) よりも最大 55%、また比較方式 2 (Distance-Based Broadcast) よりも最大 62%遅延時間が低減している。提案方式では、送信車から最も遠くの車両を中継車両に選択することにより情報のホップ数を減少させる点や交差道路の車両も中継車両として選択することにより遅延時間の増大を抑制する点が大きく寄与しているものと考えられる。また提案方式と比較方式 1 において、情報生成間隔が 1s のときよりも 0.5s のときに遅延時間が減少している。その理由として、0.5s の場合にはトラフィックが圧迫され中継送信が頻繁に衝突して、情報が途中で消

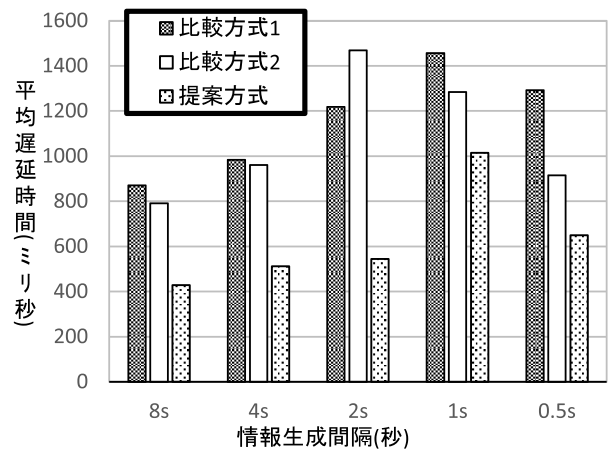


図 10 情報生成間隔と遅延時間

Fig. 10 Delay under different packet generation intervals.

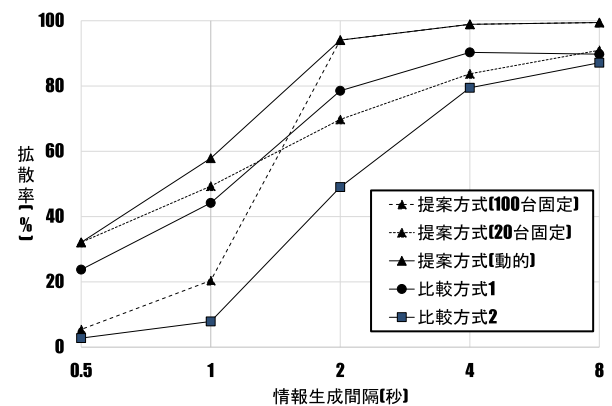


図 11 優先度割当て台数の変化と拡散率

Fig. 11 Diffusion rate under different packet generation intervals (Different schemes).

失することにより、少ないホップ数の情報の遅延時間のみが統計値として得られていることが原因と考えられる。比較方式 2 の情報生成間隔 2s から 1s の結果でも同様の現象が起きていると考えられる。

4.6 中継優先度の割当て車両台数の動的変更に関する評価と考察

中継優先度の割当て台数の最大値を 20, 100 と動的な値に設定し、情報生成間隔を変化させたときの結果を図 11 に示す。結果から、割当て台数を多く設定した場合、通信範囲内にいる多くの車両に中継優先度を割り当てるため、仮に、中継に最適な車両が情報を中継できなかった場合でも、それよりも中継優先度の低い車両が中継することで情報の拡散が止まることを防げる利点があり、情報生成間隔が長い場合では拡散率を高く保てることが分かる。

一方で、割当て台数を少なく設定した場合、中継に最適な車両のみが中継可能な車両となることで、多くの通信が衝突することになる情報生成間隔が短い場合では、1 回の通信で多くの車両へ情報を拡散できることにより拡散率が高くなっていると考えられる。

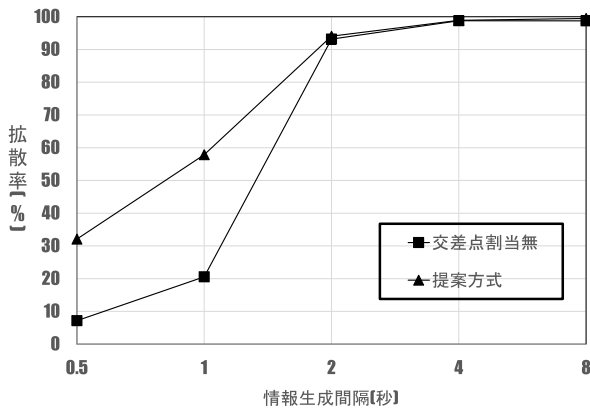


図 12 交差点道路の車両への優先度割当ての有無と拡散率

Fig. 12 Diffusion rate under different packet generation intervals (w/ and w/o priority assignment for vehicles at cross roads).

また、図から情報生成間隔に応じて中継優先度の割当て台数を動的に設定することにより、つねに高い拡散率を達成できることが分かる。

4.7 交差点道路の車両への中継優先度の割当てに関する評価と考察

図 12 に交差点道路に存在する車両に中継優先度を割り当てる機能の有無と拡散率の変化を示す。情報生成間隔が長い場合、中継優先度の割当て車両台数は多く設定されるので、交差点道路車両への中継優先度割当て機能の有無にかかわらず中継可能車両として選択される。そのため拡散率に大きな差はでない。一方で、情報生成間隔が短くなると中継優先度の割当て車両台数は小さい値に設定されるため、交差点道路の車両は中継可能車両として選択されない場合がある。結果として、交差点道路の車両に中継優先度を付与することで拡散率の向上が実現されていると考えられる。

4.8 700 MHz 帯を利用した位置情報交換の信頼性に関する評価

車両間で位置情報などと交換する 700 MHz の電波伝搬では、5.8 GHz と比較して周波数が低い分電波の到達範囲が広いことが分かっている。そのため、シミュレーションでは、各車両が正確な位置情報を取得していることを前提とした。実際に 700 MHz 帯の位置情報の交換においてどの程度の正確性が保たれるかを確かめるために簡易なシミュレーションを行った。主なシミュレーションの設定値を表 4 に示す。

700 MHz 帯を利用して 0.1 s 間隔に位置情報を交換した場合のエラーレートを図 13 に示す。図よりエラーレートは 2%~2.3%で安定して推移していることが分かる。この結果から累積値を考えると 0.2 s 間隔 (2 回受信) で 99.94%~99.96%の車両が正確な位置を把握できていると推測できる。t 秒のとき、各車両がいつせいに測位を行い、その後、

表 4 700 MHz 帯シミュレーション設定値

Table 4 Simulation parameters for 700 MHz communications.

項目	値
通信方式	IEEE802.11p
伝送速度	3Mbps
周波数帯	760MHz
パケットサイズ	128byte
最大ホップ数	1
シミュレーション時間	120s
試行回数	10 回

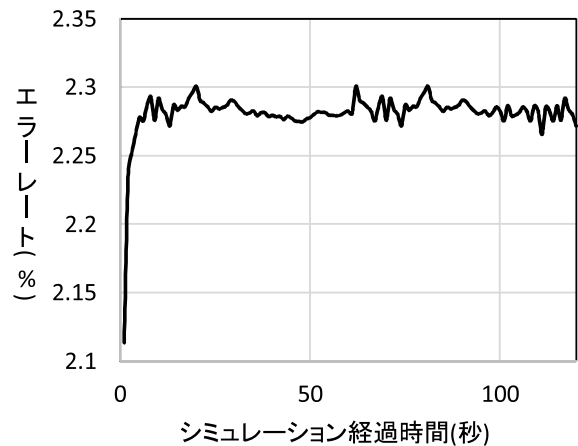


図 13 700 MHz 帯通信におけるエラーレート

Fig. 13 Packet error rate under 700 MHz.

0.1s の間隔で繰り返して送信すれば、 $t+0.2s$ から、 t 秒のときの各車両の位置情報がほぼ正確に共有され、 $t+0.2s \sim t+1.2s$ の間に中継車両の選択に使用できる。また提案方式で必要とされる位置情報の範囲 (5.8 GHz の電波到達範囲) は 700 MHz 帯より狭い範囲となり、さらに高い信頼性で位置情報の交換が可能と思われる。このため、位置情報の齟齬が提案方式に与える影響は少ないと考えられる。

4.9 車両密度の影響の考察

提案方式では、送信車両との距離の降順で各車両の中継優先度を決めて、PRIORITY_MAX までの先頭車両の中継候補とし、さらに各車両に唯一の Slot を割り当てる。したがって、background 通信がなければ、送信車両の通信範囲に位置する車両の台数 (局所の車両密度) に依存せず、唯一の車両が中継車両として選択される。background 通信がある場合、送信車両から遠い車両は、遠方の通信の影響でチャンネル BUSY を検知することがありうる。このような場合、中継優先度の一番高い車両の代わりに、次に優先度の高い車両が中継車両として選択されることになる。MAC 層では、Slot 単位で待ち時間を決めるので、それによるチャンネルの無駄が少ないが、中継車両と送信車両間の距離が減ることになる。これは CSMA/CA 自体の問題であり、完全に解決するには、キャリアセンスの閾値を含め

た動的制御が必要となる。これについては今後の課題とする。

また、提案方式では、各車両は自車両だけでなく、周辺車両と送信車両の距離も計算して自車両の中継優先度を決定するため、その計算量は局所の車両密度に応じて増加する。計算量の削減は今後の課題とする。

5. まとめと今後の課題

本論文では、車車間通信により狭域交通情報を周囲の車両で共有させる際の、送信車両とはほぼ等距離にある中継車両による転送パケットが衝突して情報の拡散効率を低下させるという既存方式の問題を解決するために、安全運転支援システムで 700 MHz 帯の電波により交換される周囲の車両の位置情報に基づいて転送車両の明確な順序付けを行う中継転送方式を提案した。シミュレーションを通じて、提案方式により既存方式と比較して拡散率が最大で 33% 向上し、また遅延時間が最大で 55% 低減するとともに、送信回数が最大で 20% 削減されることを示した。

また、中継優先度の割当て車両台数を動的に変更することにより、通信トラヒックの様々な混雑度の状態において高い拡散率を維持できることを示した。

今後の課題として、緊急度を持った情報の優先送信制御の導入、交通情報の特徴に基づいた配布範囲制御やより現実に近い道路環境モデルを利用したシミュレーションによる検証があげられる。

参考文献

[1] Williams, B. and Camp, T.: Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. MobiHoc'02*, pp.194-205 (2002).

[2] Panichpapiboon, S. and Pattara-Atikom, W.: A Review of Information Dissemination Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.14, No.3, pp.784-798 (2012).

[3] Chitra, M. and Sathya, S.S.: Efficient Broadcasting Mechanisms for Data Dissemination In Vehicular Ad Hoc Networks, *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics*, Vol.3, No.3, pp.47-63 (2013).

[4] Ni, S.-Y., Tseng, Y.-C., Chen, Y.-S. and Sheu, J.-P.: The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network, *Proc. MobiCom'99*, pp.151-162 (1999).

[5] Korkmaz, G., Ekici, E., Ozguner, F. and Ozguner, U.: Urban Multi-Hop Broadcast Protocol for Inter-Vehicle Communication Systems, *Proc. VANET '04*, pp.76-85 (2004).

[6] Chang, S.-W. and Lee, S.-S.: A Study on Distance-based Multi-hop Broadcast Scheme for Inter-Vehicle Communication, *Proc. ICITCS'13* (2013).

[7] Sanguesa, J.A., Fogue, M., Garrido, P., Martinez, F.J., Cano, J.-C. and Calafate, C.T.: Using topology and neighbor information to overcome adverse vehicle density conditions, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.42, pp.1-13 (May 2014).

[8] Schwartz, R.S., Das, K., Scholten, H. and Havinga, P.:

Exploiting Beacons for Scalable Broadcast Data Dissemination in VANETs, *Proc. VANET '12*, pp.53-62 (2012).

[9] Shagdar, O., Ohshima, T., Shirazi, M.N., Tang, S., Suzuki, R., Miura, R. and Obana, S.: Message dissemination in inter-vehicle CDMA networks for safety driving support, *Proc. IEEE VTC2009-Spring* (2009).

[10] Li, Y., Papanastasiou, S., Akhlaghinia, J. and Peytchev, E.: TMDA: A Broadcast-Based Message Delivery Algorithm for VANETs, *International Journal on Advances in Telecommunications*, Vol.6, No.1&2, pp.34-44 (2013).

[11] Cunha, F.D., Maia, G.G., Viana, A.C., Mini, R.A., Villas, L.A. and Loureiro, A.A.: Socially Inspired Data Dissemination for Vehicular Ad Hoc Networks, *Proc. MSWiM '14*, pp.81-85 (2014).

[12] Fogue, M., Garrido, P., Martinez, F.J., Cano, J.-C., Calafate, C.T. and Manzoni, P.: Evaluating the impact of a novel message dissemination scheme for vehicular networks using real maps, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.25, pp.61-80 (Dec. 2012).

[13] Ros, F.J., Ruiz, P.M. and Stojmenovic, I.: Acknowledgment-Based Broadcast Protocol for Reliable and Efficient Data Dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.11, No.1, pp.33-46 (2012).

[14] Cuomo, F., Rubin, I., Baiocchi, A. and Salvo, P.: Enhanced VANET broadcast throughput capacity via a dynamic backbone architecture, *Ad Hoc Networks*, Vol.21, pp.42-59 (Oct. 2014).

[15] 大西亮吉, 吉岡 顕: 700MHz 帯車車間通信による交通情報共有手法の検討, *情報処理学会論文誌*, Vol.56, No.1, pp.161-170 (2015).

[16] Mangold, S., Choi, S., May, P., Klein, O., Hiertz, G. and Stibor, L.: IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service, *Proc. European Wireless*, pp.32-39 (2002).

[17] Suthaputthakun, C. and Ganz, A.: Priority Based Inter-Vehicle Communication in Vehicular Ad-Hoc Networks using IEEE 802.11e, *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, VTC2007-Spring*, pp.2595-2599 (2007).

[18] Suthaputthakun, C. and Sun, Z.: Priority based Routing Protocol with Reliability Enhancement in Vehicular Ad hoc Network, *Proc. 2nd International Conference on Communications and Information Technology*, pp.186-190 (2012).

[19] 一般社団法人電波産業会: ARIB STD-T109 1.2 版, 700MHz 帯高度道路交通システム標準規格 (2013-12-10).

[20] Space-Time Engineering, Scenargie Simulator, available from <https://www.spacetime-eng.com/en/>



吉川 潤

1990 年生。2013 年電気通信大学情報工学科卒業。2015 年同大学大学院博士課程前期修了。この間、車車間通信による情報共有方式の研究に従事。同年トヨタ自動車(株)入社。



湯 素華 (正会員)

1998年中国科学技術大学電子情報工学科卒業。2003年同大学院博士課程修了。工学博士。同年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所研究員。2014年電気通信大学大学院情報理工学研究科助教。アドホックネットワーク, ITS, 省電力無線通信, マルチメディア通信の研究に従事。電子情報通信学会, IEEE各会員。



小花 貞夫 (正会員)

1953年生。1976年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1978年同大学院修士課程修了。同年国際電信電話(株)(現, KDDI(株))入社。パケット交換方式, ネットワークアーキテクチャ, OSIプロトコル実装, データベース, ビデオテックス, 分散処理, ネットワーク管理の研究・開発に従事。2004年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所所長。2011年電気通信大学大学院情報理工学研究科教授。無線アドホックネットワーク, 高度交通システム(ITS), センサネットワーク, ネットワーク低消費電力化等の研究に従事。工学博士。2001年文部科学大臣賞(研究功績者), 電子情報通信学会会員。本会フェロー。