

CB-Flooding：緊急車両接近通知のための 条件ベースフラッディング手法

原田 亮^{1,a)} 鈴木 理基¹ 神田 翔平¹ 重野 寛¹

受付日 2011年3月31日, 採録日 2011年10月3日

概要：本論文では、緊急車両の優先走行を円滑にするための緊急車両接近通知において、交差点でのパケット伝搬を考慮し、受信車両が遭遇推定を用いて中継すべきかを自律的に判断する条件ベースフラッディング手法 CB-Flooding を提案する。CB-Flooding では、通常は Greedy Forwarding により中継車両を制限し、交差点では交差点近傍の車両が中継をして全道路セグメントにパケットを伝搬させる。加えて、緊急車両の走行経路外でパケットを受信した車両は、周辺の交通状況から緊急車両と遭遇するかを推定し、遭遇する場合のみ中継する。都市部を想定した環境でシミュレーションを行い、CB-Flooding が特に道路が混雑した状況において高いパケット散布率を維持しつつ総パケット送信数を抑えているという結果から、CB-Flooding の有用性を示す。

キーワード：緊急車両接近通知, 条件ベースフラッディング, 車車間通信

CB-Flooding: Condition Based Flooding Method for Approach Warning of Emergency Vehicle

RYO HARADA^{1,a)} MASAKI SUZUKI¹ SHOHEI KANDA¹ HIROSHI SHIGENO¹

Received: March 31, 2011, Accepted: October 3, 2011

Abstract: The approach warning of emergency vehicle is a vehicle-to-vehicle messaging for cooperative driving between emergency vehicle and its surrounding vehicles. It provides emergency vehicle smooth driving through the urban roads by letting the surrounding vehicles stay away from it safely in timely manner. In this paper, we propose CB-Flooding, a condition based flooding method. In our proposal, every receiver decides to forward packets by themselves, according to the situation. In the normal case, vehicles forward packets the same way as Greedy Forwarding. At the intersection, every vehicle forwards packets to all directions. In addition, vehicles which are not in the emergency vehicle's way when they receive a packet, they estimate whether they are going to be on the road where the emergency vehicle plans to drive. Only if vehicles could be possibly in the emergency vehicle's way before emergency vehicle passes, they forward packets. We evaluate CB-Flooding through the computer simulation, assuming the urban traffic and road environment. The results show that the packet arrival rate keeps up a high level, while keeping the total number of packets reasonably low amount.

Keywords: approach warning of emergency vehicle, condition based flooding, vehicle-to-vehicle messaging

1. はじめに

救急車や消防車、パトカー等の緊急車両は、緊急時には

サイレンを鳴らす等して道路を優先的に走行し、一刻も早く現場に到着することが求められる。特に救急車は、1分の遅れにより救命率が10%低下するため、都心部において平均6分05秒かかる現場到着までの所要時間を短縮することは、非常に意味がある [1], [2]。

そこで ITS では、緊急車両の優先通行を円滑にするために緊急車両の接近通知パケットを散布することが考えられ

¹ 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University,
Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan

^{a)} its@mos.ics.keio.ac.jp

ている [3]. 緊急車両の接近通知とは、緊急車両が遭遇する車両に対して接近通知パケットを散布することである。ここで遭遇とは、任意の車両が緊急車両の走行に影響を及ぼすほど十分に近接することであり、具体的には、任意の車両が緊急車両に追い越される、すれ違う、または交差点で出会うことである。しかし、緊急車両との遭遇を厳密に予測することは難しいため、本論文では遭遇する可能性のある車両（遭遇候補車両）に接近通知パケットを散布することを目的とする。

接近通知は不特定多数の車両に散布する必要があるため、車車間通信を用いてフラッディングを行うと効率が良い。フラッディングを用いた既存手法では、緊急車両の予定走行経路に沿って接近通知パケットを伝搬させる手法と、地理的に指定した散布範囲にパケットを伝搬させる手法が考えられる [4], [5]. 前者は、都市部の環境ではシャドウイングが発生し、交差点において接続する全道路にパケットを散布できない可能性がある。後者は、送信車両が遠方の交通状況を把握することは難しいため、送信車両が行う散布範囲の推定は誤差が大きくなる可能性がある。散布範囲を十分に広くとることで予定走行経路にいない遭遇候補車両にもパケットを伝搬させることができるが、冗長なパケットが増大する。以上より、交差点におけるパケット中継方法を工夫し、送信車両が伝搬範囲を決定せずに動的に変化できる手法が必要である。

そこで本論文では、交差点でのパケット伝搬を考慮し、受信車両が遭遇推定を行うことで中継を行うか否かを自律的に判断して散布範囲を制御する条件ベースフラッディング手法 CB-Flooding を提案する。ここで、遭遇推定とは、自車両が遭遇候補車両であるかを推定することであり、具体的には緊急車両の予定走行経路上に緊急車両より前に到着する可能性があるかどうかを推定することである。緊急車両が送信した接近通知パケットを受信した車両は、ビーコンで得た隣接車両情報をもとに Greedy Forwarding [6] により自身が中継すべきかを判断し、該当する場合は即座にパケットを中継する。交差点周辺では、交差点近傍の車両がパケットを中継することで、この交差点に接続した各道路セグメントにパケットを伝搬させる。そして、特に緊急車両の予定走行経路外でパケットを受信した車両は、周辺の交通状況や緊急車両と遭遇する交差点までの距離をもとに、交差点に到達する時刻を算出する。求めた時刻と緊急車両の交差点到達予定時刻を比較し、自身が到着する方が早いと分かった場合は中継を行い、遅い場合には中継を行わない。これにより、遭遇候補車両のみがパケットを受信でき、緊急車両の優先通行をサポートすることができる。

以下、2章で関連研究と問題点を明らかにし、3章で問題を解決する CB-Flooding を提案する。そして4章でシミュレーションにより提案手法の有用性を示し、5章に結論を示す。

2. 関連研究

2.1 緊急車両接近通知

緊急車両接近通知とは、緊急車両の優先通行を円滑にするために、遭遇候補車両に事前に接近通知パケットを散布することである [3]. 遭遇候補車両としているのは、緊急車両は一般車両の走行経路を取得できないため、実際に遭遇する車両を事前に完全に特定するのは不可能だからである。まず送信車両となる緊急車両は、走行開始時に接近通知パケットを生成しブロードキャストする。このパケットを受信した車両は、パケット内にある緊急車両に関する情報を取得し、避讓行動をとる。同時に、受信したパケットを中継して周辺にも散布することで、周辺車両も避讓行動をとることができる。このように、接近通知パケットを車車間通信を用いて広く伝搬させることで、緊急車両の優先通行をサポートする。

ここで問題と考えられるのが、緊急車両から遠方にある遭遇候補車両が遭遇時刻より非常に前に接近通知パケットを受信する可能性があることである。しかし、接近通知パケットには緊急車両の任意の交差点に対する予定通過時刻が明記されているため、アプリケーションで適切なタイミングで通知することができると考えられる。

2.2 フラッディングによる緊急車両接近通知

緊急車両接近通知は不特定多数の車両へ通知する必要があるため、フラッディングが有効であると考えられる。フラッディングはブロードキャストを繰り返し行うため、接近通知パケットを広範囲に散布可能である。しかし、ピュアフラッディングを用いると、隣接車両どうしが同時にブロードキャストを行うことによるパケット衝突や、ブロードキャストストーム問題が発生する [7]. よって、緊急車両接近通知ではフラッディングを改良し、冗長なパケットを減らしながら遭遇車両すべてに散布する手法が必要である。そのための既存手法として、中継車両制御手法と中継範囲制御手法について述べる。

中継車両制御手法では、隣接車両の同時送信によるパケット衝突を防ぐため、同一パケットを受信した車両の中で、選択した車両のみがブロードキャストを行う。文献 [8] では、道路を仮想セルに分割し、セル内で中心に最も近いノードのみがブロードキャストを行うことで、隣接車両間での重複中継を抑制する。文献 [9] では、相対速度と進行方向から求める予測待機時間 (PHT) を用いることで、PHT により選択された車両が中継できる可能性を高める。文献 [4] では、パケット受信車両が1ホップ前の車両の隣接車両と自車両の隣接車両を比較し、同一隣接車両が少ないほど待ち時間を小さく設定する手法 LCN が提案されている。各車両は待ち時間だけ待機し、その間に他車両のブロードキャストをオーバヒアした場合には中継を行わず、

しなかった場合のみ再ブロードキャストする。これにより、中継した車両から遠い位置にいる車両を選択する確率が高くなり、冗長なパケットを削減する。フラッディングの手法ではないが、Lochert らの GPCR [10] は交差点内の車両がパケット中継することでユニキャストのパケット到着率を向上させている。

中継範囲制御手法では、宛先範囲を指定してブロードキャストを行い、範囲内にある車両すべてにパケットを伝搬させる。文献 [11] では、GeoGRID により宛先領域までパケットを伝搬させ、宛先領域内でパケットを受信した車両はブロードキャストする。GeoGRID とは、ネットワークをいくつかの領域に分割し、各領域において中心に最も近いノードのみがパケットの転送を行う手法である。文献 [12] は、宛先領域内で効率的にデータを散布する手法である。パケットが宛先領域まで伝搬されると、宛先領域内に最も長くとどまる車両がデータを散布する。文献 [5] では、送信車両が情報を散布する範囲を指定することで、冗長なブロードキャスト中継を低減させる手法 LBM が提案されている。LBM ではジオキャスト領域とフォワーディング領域を設定し、その範囲内にある車両のみがパケットをブロードキャストする。それ以外の領域では中継を行わないため、指定した領域にのみパケットは伝搬される。

2.3 問題点

中継車両制御手法の既存研究では、交差点で接続する全道路セグメントに散布できないという問題がある。これは、都市部の交差点においては建物等のシャドウイングによりパケットの伝搬が遮られる特性があるために発生する。建物がある交差点環境においての通信実験では、見通し外 4m を超えるとパケットが伝搬できなくなることが報告されている [13]。そのため、交差点を越えても見通しがある道路セグメントにはパケットが伝搬できるが、見通しがない道路セグメントには伝搬されない可能性がある。すると、遭遇車両が存在する道路セグメントへのパケット伝搬ができなくなり、目的である遭遇車両へのパケット散布率が低くなる。Lochert らは GPCR を提案し、交差点内の車両を中継することでパケット到着率を上げている [10]。しかし、GPCR はユニキャストベースのルーティングプロトコルであるため、緊急車両接近通知で必要な交差点に接続する全道路セグメントへの散布は達成できない。以上のことから、フラッディングを用いた場合の交差点における中継方法を工夫する必要がある。

中継範囲制御手法の既存研究では、地理的な散布範囲を適切に設定できないという問題がある。緊急車両接近通知では、緊急車両と遭遇車両にあらかじめ接近通知パケットを散布することで効果が現れる。既存研究では送信車両が散布範囲を設定しているが、遭遇車両は各道路の交通状況により変化する。送信車両が散布範囲を小さく設定する

と、接近通知パケットが伝搬されない遭遇車両が発生する可能性が高まる。また、散布範囲を大きく設定すると、遭遇車両を含めたネットワーク上のほとんどの車両にパケットが伝搬されるが、必要のない領域にもパケットが伝搬されるため、冗長性が増す。これを改善するためには、送信車両が伝搬範囲を指定するのではなく、パケットを受信した車両が何らかの方法で散布すべきかを自律的に判断し、冗長性を抑えながら遭遇車両にパケットを伝搬させる手法が必要である。

3. CB-Flooding: Condition Based Flooding の提案

3.1 概要

CB-Flooding は、交差点でのパケット伝搬を考慮し、受信車両が遭遇推定を行うことで中継すべきか否かを自律的に判断して散布範囲を制御する条件ベースフラッディング手法である。これにより、建物等のシャドウイングの影響により交差点に接続する全道路セグメントにパケットを散布できないという問題と、固定的な散布範囲により冗長なパケットが発生するという問題の、2つの問題に対処する。Lochert らが提案した GPCR [10] のように、交差点での中継を利用することによりパケット到着率を向上させる方式も提案されているが、本提案方式では条件ベースの中継判断と交差点での中継を組み合わせることで、パケットの散布範囲（宛先）そのものを制御し、パケット散布率を向上させながらオーバーヘッドを低く抑えている点が異なる。

図 1 に CB-Flooding におけるパケットを受信した車両のアルゴリズムを示す。緊急車両は予定走行経路上にある最も近い交差点を中継点とした接近通知パケットを送信する。そのパケットを受信した車両は基本的に Greedy Forwarding [6] を用いて中継を行う。すなわち次中継交差点に最も近い車両がパケットを即座に中継する。その他の車両は待機し、このパケットを一定時間オーバーヒアしなかった場合は再度中継するかを判断する。交差点近傍で中継する際は、交差点通過フラグを立てブロードキャストし、このパケットは交差点に接続する各道路セグメントに中継される。ここで交差点近傍とは、交差点に接続する全道路セグメントに対して電波伝搬上見通しが得られる領域と定義し、プロトコル上は道路幅と交差点で電波の回り込みが期待できる距離を基に交差点近傍の範囲を決定する。各セグメントで最初にこのパケットを中継する車両は、パケット中の次中継交差点 ID を更新し、中継する。緊急車両の予定走行経路上では、同様にパケットを伝搬させる。予定走行経路外では、遭遇推定により遭遇候補車両となるかを推定し、該当する場合のみ中継を行う。以上により、各交差点で接続する道路セグメントすべてにパケットを伝搬させ、また遭遇候補車両にパケットを散布することができる。

なお、提案手法において転送範囲はあらかじめ決めてお

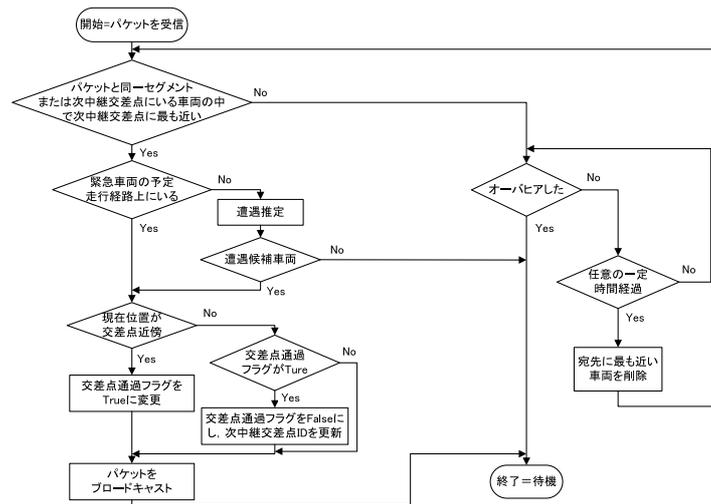


図 1 CB-Flooding における中継車両のアルゴリズム

Fig. 1 The algorithm of transfer vehicle when using CB-Flooding.

らず、遭遇推定に基づいて変化する。また、中継車両はパケットを即座に転送するため、転送時間は車両の移動に対して十分に短い。これらのことは、接近通知を必要としない車両も含め多くの緊急車両の到着前に接近通知パケットを受信することを意味する。したがって、ドライバにどのタイミングで通知するか、あるいはしないかの判断は、アプリケーションが別途判断することを想定する。

以下では、前提条件や中継車両選択方法、交差点でのパケット散布方法、遭遇推定方法、遭遇推定に利用する周辺車両の平均速度算出方法について述べる。

3.2 前提条件

すべての交差点は一意的 ID があてられており、各車両は交差点 ID や道路長、道路幅が記載されたロードマップを保持する。緊急車両は目的地までの走行経路を接近通知パケット送信前に決定しているものとし、カーナビゲーションシステムを用いて経路上の交差点通過時刻を得ている。各車両は GPS から現在位置を特定でき、またビーコンを周期的に送信しており、1 ホップ内の隣接車両情報を隣接車両テーブルに記録している。

緊急車両は接近を通知する接近通知パケットを周期的にブロードキャストする。送信周期は緊急車両の移動や周囲の交通状況の変化に対応するため、数十秒から数分に1度送信することを想定する。緊急車両はあらかじめパケット内に、パケット送信時の緊急車両位置と時刻、緊急車両の予定走行経路上にある交差点 ID と通過時刻のリストを記載する。また、中継の途中で書き加えるために、前中継交差点 ID と次中継交差点 ID、パケット通過交差点 ID リスト、交差点通過フラグを設ける。前中継交差点 ID と次中継交差点 ID とは、パケットが現在通過している道路セグメントにおいて、パケットの進行方向に対するそれぞれ始点と終点となる交差点の ID を示す。緊急車両ははじめに、

次中継交差点 ID を予定走行経路上にある最も近い交差点の ID とし、前中継交差点 ID を道路セグメントの反対側の交差点の ID としてブロードキャストする。パケット通過交差点 ID リストとは、現時点でパケットが通過した交差点 ID の集合である。交差点通過フラグとは、交差点内の車両が中継したことを表すフラグであり、2 値で表す。

3.3 中継車両選択方法

パケット衝突や冗長なパケットを減らすため、Greedy Forwarding を応用して中継車両を選択する [6]。Greedy Forwarding とは、ビーコンで取得した情報から作成した隣接車両テーブルを基に隣接車両の中で宛先に最も近いかを判断し、該当する場合のみ中継を行う手法である。ここで隣接車両とは、1 ホップ内の同一道路セグメントまたは接続する交差点にいる車両であり、隣接車両テーブルには各車両の位置や速さ、進行方向を格納する。パケットを受信した各車両は、隣接車両テーブルの各車両の位置を参照する。これらの位置情報と最大無線通信距離を用い、パケットを受信可能な車両の中で自身が最も次中継交差点に近いかを判断する。該当する場合は、緊急車両の予定走行経路上にいればパケットをすぐに中継するが、予定走行経路外にいる場合は後述する遭遇推定を行い中継するかを判断する。該当しない場合は待機し、その間にパケットをオーバーヒアすると中継を行わずに待機を終える。一定時間経ってもオーバーヒアしなかった場合は、先ほどパケット中継候補であった車両を除いて再び自車両が最も次中継交差点に計算し、該当する場合はすぐに中継する。これによりパケット中継を確実に進行。以上を次中継交差点の交差点近傍にいる車両が受信するまで続けることで、道路セグメントに沿って交差点近傍までパケットを伝搬させる。

図 2 に緊急車両 A から次中継交差点 ID 2 までパケットを伝搬させる様子を示す。緊急車両 A がブロードキャスト

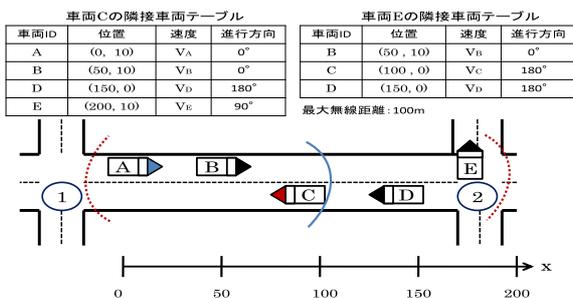


図 2 中継車両選択方法

Fig. 2 Selecting method of relay vehicle.

トしたパケットは、実線で示した車両 A の通信範囲内の車両 B と C が受信する。車両 C は隣接車両テーブルを用いてパケットを受信可能な車両の中で最も次中継交差点に近いと判断し、中継する。車両 B も同様に行い、最も近いのは車両 C だと判断し、中継を行わない。次に車両 C が中継したパケットを点線で示した車両 C の通信範囲内の車両 A, B, D, E が受信する。各車両は先と同様に行い、結果として車両 E が選択される。このように、次中継交差点までパケットを伝搬させる。

3.4 交差点でのパケット散布方法

交差点では接続する道路セグメントすべてにパケットを散布するため、複製したパケットの次中継交差点 ID を各道路セグメントの反対にある交差点の ID に変化させる。はじめに、交差点内の車両がパケットを受信した場合、パケット通過交差点 ID リストに現在位置する交差点 ID が含まれていないかを確認する。含まれる場合はパケットがループしていると考え、破棄する。中継車両選択手法によって交差点内の車両が中継を行う場合、交差点内車両は交差点通過フラグを True に変更しブロードキャストする。このパケットを受信した車両は、現在位置する各道路セグメントの両端がパケット内の前中継交差点 ID と次中継交差点 ID であるかを判断する。これはパケットが同一方向に戻っていることを表しており、この場合は中継を行わない。次に、中継車両選択方法に基づき自身が中継を行うかを判断する。中継を行う各車両は、前中継交差点 ID を次中継交差点 ID からコピーし、またロードマップと現在位置からもう一方の交差点を把握して次中継交差点 ID を変更する。そして、パケット通過交差点 ID リストに前中継交差点 ID を加え、再ブロードキャストする。各方向に散布されたパケットは、中継車両選択方法に従いそれぞれの次中継交差点 ID に向けて中継される。これを各交差点で行うことで、パケットが通過した道路セグメントを除いて接続する道路セグメントすべてにパケットを伝搬させる。

ここで、交差点近傍に車両が存在せず中継が途絶えてしまうことと、交差点間隔が短い場合にオーバーヘッドが増加するという問題が考えられる。前者に関しては、道路が双

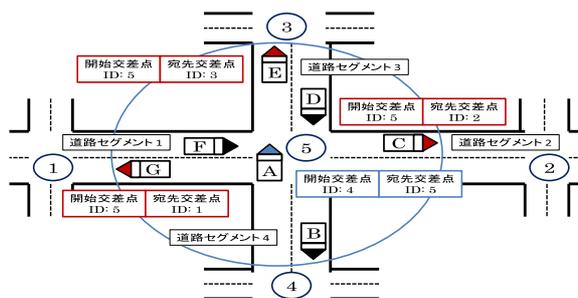


図 3 交差点でのパケット散布

Fig. 3 Packet distribution at intersection.

方向でかつ交差点には直交道路もある都市部の環境では、信号で停止している車両も含めて中継可能な車両が存在しない可能性は低いと想定している。もちろん、車両密度が極端に低く 1 台も車両が存在しない場合にはパケットは中継されないが、この場合は接近通知パケットを周期的に繰り返すことである程度対応することができる。後者に関しては、全遭遇候補車両にパケットを散布するため、オーバーヘッドが多少増えたとしてもすべての交差点でパケット散布することに意味がある。ただし、交通量がほとんどない道路を事前に把握していれば、運用上はその道路に接続している交差点をパケット中継の対象とせず、オーバーヘッドを多少削減することができる。

図 3 に車両 A が道路セグメント 4 にいる車両 B から中継されたパケットをブロードキャストし、各道路セグメントの車両が受信した様子を示す。道路セグメント 4 にいる車両 B は、現在いる道路セグメントがパケット内に記載された前中継交差点 ID と次中継交差点 ID 間であると分かり、中継を行わない。道路セグメント 1 から 3 では、中継車両選択方法に従いそれぞれ車両 G, C, E が選択される。中継する各車両は前中継交差点 ID を 5 に変更し、次中継交差点をそれぞれ 1, 2, 3 に変更してブロードキャストする。また、パケット通過交差点 ID リストに 5 を加える。これにより、道路セグメント 4 を除いたすべての道路セグメントにパケットを伝搬させる。

3.5 遭遇推定方法

接近通知パケットを散布すべき車両を特定するため、予定走行経路外で中継車両選択手法により選択された車両は、遭遇推定を用いて遭遇候補車両となるかを判断し、パケットを中継するかを決定する。遭遇推定とは、任意の車両が緊急車両の予定走行経路上に緊急車両より前に到着する可能性があるかを推定することである。遭遇推定では、パケット内に記載された緊急車両のある交差点に到着する時刻と、任意の車両が車両・遭遇交差点間距離と後述する周辺車両の平均速度を用いて計算した同一交差点までの到着時刻を比較する。車両・遭遇交差点間距離とは、現在位置から対象の交差点まで最短ルートで走行した場合の距離

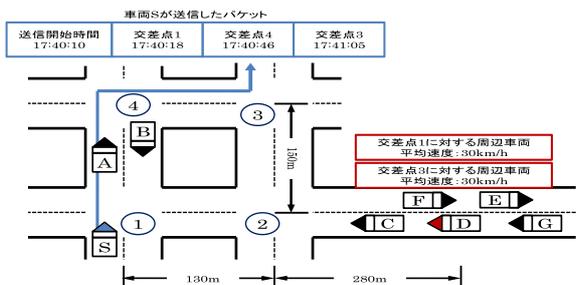


図 4 遭遇推定方法

Fig. 4 Encounter estimating method.

である。互いの交差点到着時刻を比較した結果、任意の車両が緊急車両より先に到着すると分かった場合、その後の走行で緊急車両と出会う可能性がある遭遇候補車両と見なす。これを緊急車両が通過する予定のすべての交差点に対して、車両・遭遇交差点間距離が短い順に推定を行い、ある交差点で遭遇すると分かった場合は推定を終え、パケットを中継する。

ここで、交通状況が激しく変化する環境においては、遭遇推定に大きな誤差が発生し、遭遇候補車両にパケットを散布できないという問題が考えられる。交通状況の変化に対応できるように、本方式では接近通知パケットを数十秒から数分間隔で周期的に送信することを想定している。送信周期をさらに短く設定することで対処することが考えられるが、散布率が向上するかわりにオーバーヘッドが増大するというトレードオフが発生する。最適な送信周期に関しては、様々な交通状態における評価と検討が必要であり、今後の課題とする。

図 4 に車両 D が緊急車両 S の生成した接近通知パケットを受信し、遭遇推定をする様子を示す。はじめに、車両 D はパケット内に記載された緊急車両の通過交差点リストから、車両・車両・遭遇交差点間距離が最も近い交差点 1 を選ぶ。後述する周辺車両平均速度が 30 km/h、交差点 1 までの距離が 410 m とすると 49.2 s となるため、17:41:59 に到着する。これは、緊急車両が交差点 3 に到達する時刻 17:40:18 より遅いため、遭遇しないと判断する。次に交差点 3 を遭遇交差点とすると、交差点 3 までの距離 430 m から 51.6 s かかり 17:41:01 に到着するのに対し、緊急車両は 17:41:05 に到着するため遭遇候補車両と判断し、後方へのパケット伝搬を行う。以上のように動作することで、遭遇候補車両であると推定した場合のみ中継し、冗長なパケットを抑えながら必要な車両にパケットを伝搬させることができる。

3.6 周辺車両の平均速度算出

遭遇推定する際には、道路の現在の交通状況を反映させるため、周辺車両の平均速度を求めることで遭遇交差点までかかる時間を推定する。周辺車両の平均速度とは、求め

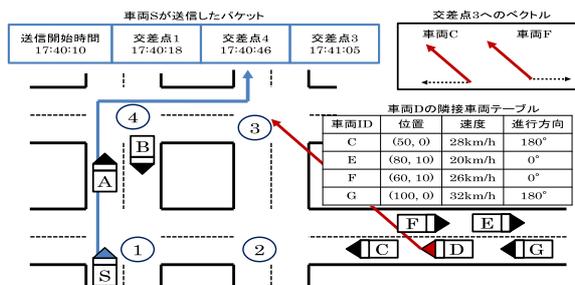


図 5 周辺車両の平均速度算出方法

Fig. 5 Calculating method of average speed around vehicles.

る遭遇交差点方面に進行している車両の速度を平均したものである。遭遇推定を行う車両は隣接車両テーブルを参照し、自身から遭遇交差点へのベクトルと、各隣接車両の進行方向ベクトルを比較する。この2ベクトルのなす角度 θ が十分に小さい場合、遭遇交差点に向かい進行している車両と判断し、周辺車両の平均速度算出の対象車両とする。これを全車両に対して行うことで周辺車両を導き出し、該当する車両群の平均速度を求める。

図 5 に車両 D が遭遇交差点 3 に対する周辺車両の平均速度を算出する様子を示す。ここでは、2ベクトルのなす角度が 90° 未満の場合、周辺車両の平均速度算出の対象車両とする。はじめに、車両 D は実線で示す交差点 3 までのベクトルと車両 C の進行方向ベクトルを比較する。2ベクトルのなす角度は 90° 未満のため、車両 C は対象車両となる。同様に車両 E, F, G も行い、車両 G のみ対象車両となる。よって、周辺車両の平均速度は車両 C と G の平均速度 30 km/h と求まる。以上のように行うことで、実際の交通状況を用いた速度を算出することができる。

4. 性能評価

4.1 シミュレーション概要

CB-Flooding の有用性を評価するため、シミュレーションを実装した。

図 6 にシミュレーションモデルを示す。シミュレーションでは都市部を想定し、道路が格子状となるモデルを使用した。車両 S が緊急車両を表しており、この位置で接近通知パケットを送信してから走行を開始し、交差点 7 を通過して交差点 8 まで走行する。シミュレーションにおいては、接近通知パケットの送信は最初の 1 回のみとした。緊急車両の速度は文献 [14] で都市部において緊急車両は 30 km/h から 50 km/h で走行すると報告されているため、約 40 km/h とした。その結果、走行開始位置から交差点 7 までは 15 秒間、交差点 7 から交差点 8 までは 32 秒間で到達する。道路幅は 4 m で、両脇に 2 m の歩道を設けた。道路の間には建物がありシャドウイングが発生する環境と、建物がなくシャドウイングが発生しない環境の 2 つを使用した。建物があるモデルでは、電波の回り込みが期待でき

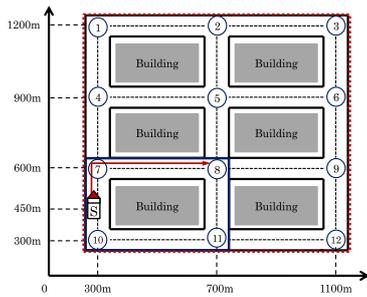


図 6 シミュレーションモデル
Fig. 6 Simulation model.

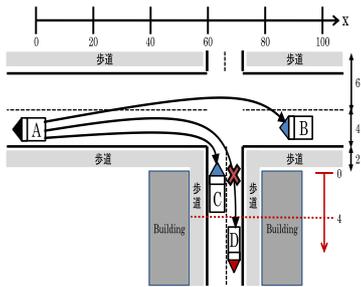


図 7 交差点周辺でのパケット伝搬
Fig. 7 Packet propagation at intersections.

表 1 シミュレーションパラメータ
Table 1 Simulation parameters.

ネットワークシミュレータ	QualNet version 5.0.0
無線通信方式	IEEE802.11b
車両数	264~612 台
車両密度	22.5~52.2 vehicles/km
最大無線通信距離	100 m
ビーコンパケット長	48 byte
データパケット長	100 byte
ビーコン送信周期	500 ms
見通し外通信距離	4 m
θ	90° 未満

る幅 X を 2.4GHz 帯よりも伝搬条件が厳しい 5.8GHz 帯の電波伝搬実験結果 [13] を参考にして 4m に設定し、交差点幅にその長さを加えた範囲を交差点近傍とした。図 7 に交差点周辺でのパケット伝搬の様子を示す。車両 A がブロードキャストしたパケットに対し、車両 B と C は受信できるが、見通し外 X_m より遠い位置にいる車両 D は受信できない。シミュレーションサイズは約 1km 四方であり、提案手法における最大転送距離も同様とした。

表 1 にシミュレーションで用いたパラメータを示す。シミュレーションは、車両密度とパケット散布方法を変化させ、各条件について各 10 回試行を行い、その平均値を利用した。シミュレーションでは、交通流シミュレータ VISSIM ver5.00-02 [15] を用いて都市部の車両交通のデータを生成し、その交通流データをもとにさらにネットワークシミュレータ Qualnet5.0 [16] を用いてシミュレーションを行った。交通流のシミュレーションでは、片側 1 車線

の双方向道路で信号有り、右折レーン有りのモデルを利用した。ネットワークシミュレータでは、通信のエラーに関しては、2 波モデルにより電波伝搬損を計算し、SINR からパケット誤り率 (PER) を求めている。ただし、シャドウイングが発生する領域には電波が到達しないものとした。座標位置はエラーフリーとしたが、ビーコンにより互いの位置を交換しているため、隣接車両テーブルが一致していないという状態は再現されている。データパケットは UDP, IP 等のヘッダは含まず、中身は送信車両位置、送信開始時刻、予定走行経路上にある交差点 ID と時刻のリスト、前中継交差点 ID、次中継交差点 ID、パケット通過交差点 ID リスト、交差点通過フラグであり、計 100 Byte とした。見通し外通信距離は文献 [13] を参考に 4m とした。シミュレーションでは車両密度を変化させるが、車両密度が小さいとシミュレーション内に存在する車両の平均速度が速くなる。この場合、緊急車両からの接近通知パケットを受け取れなかったとしても、避讓行動をしやすい環境であるといえる。一方、車両密度が大きい場合、車両の平均速度は遅くなる。この場合では、避讓行動をするためのスペースが存在しない可能性が高いため、接近通知パケットをあらかじめ受信することが重要となる。最大無線通信距離は 100m とした。

4.2 評価項目と比較対象

評価項目はパケット散布率と総パケット送信数について行った。パケット散布率とは、緊急車両と遭遇した車両の中で事前に接近通知パケットを受信した車両の割合のことであり、100%に近いほど緊急車両は優先通行をしやすいといえる。総パケット送信数とは、1 回の接近通知パケット散布で行われる全車両のパケット送信回数合計のことであり、少なれば少ないほど冗長なパケットを減らしているといえる。本論文では遭遇車両に接近通知パケットを散布しながら冗長なパケットを減らすことを目標としているため、パケット散布率を高く保ちながら総パケット送信数を減らす手法が優れているといえる。

比較対象は提案手法である 2 種類の CB-Flooding と、既存研究である文献 [4] と文献 [5] で示した LCN と LBM を組み合わせた 2 種類の SL-Flooding である。CB-Flooding では、通常の CB-Flooding と提案手法から遭遇推定方法を除き隣接する道路セグメントを散布領域に加えた CB-Flooding (without Estimation) を用いた。この 2 つを比較することにより、遭遇推定方法の有効性をはかる。SL-Flooding では送信車両が散布範囲を決定するが、散布範囲により SL-Flooding (Large) と SL-Flooding (Small) を利用した。前者は散布範囲をシミュレーションエリア全体とし、後者は緊急車両の走行経路上を包含する最小の範囲とした。また、CB-Flooding と SL-Flooding-Large は交差点でのシャドウイングを考慮した場合と考慮しない場合につ

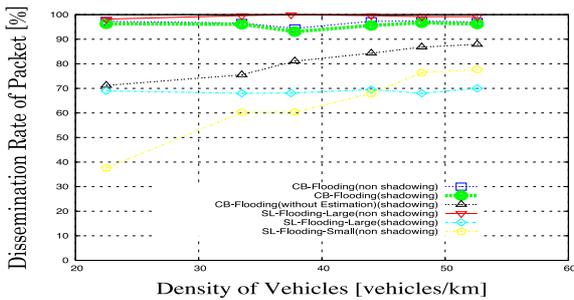


図 8 パケット散布率

Fig. 8 Dissemination rate of packet.

いて比較し、CB-Flooding (without Estimation) はシャドウイングを考慮した場合のみを、SL-Flooding (Small) はシャドウイングを考慮しない場合のみを比較した。

4.3 パケット散布率

図 8 に車両密度を変化させた場合のパケット散布率を示す。

CB-Flooding は、シャドウイングの有無にかかわらず、どの車両密度の場合でもつねに 90%以上を達成している。これにより、CB-Flooding は交差点近傍の車両が中継を行うことで、交差点で散布すべき全道路セグメントにパケットを伝搬させることができていることを示している。また、遭遇推定による遭遇候補車両の選定により、実際に緊急車両に遭遇した車両に対して接近通知パケットを散布できていることも示している。

CB-Flooding (without Estimation) は、CB-Flooding に比べパケット散布率が 10%以上低下している。これは、実際に遭遇する車両は緊急車両の予定走行経路の隣接する道路セグメントよりさらに遠い場所にも多く存在するためである。この結果は、緊急車両の予定走行経路とそれに隣接する道路セグメントにパケットを散布するだけでは、緊急車両接近通知には不十分であり、遭遇推定によってパケット散布範囲を制御することが有効であることを示している。

SL-Flooding-Large は、シャドウイングがない環境においては、つねにほぼ 100%のパケット散布率を達成している。これは、散布範囲をシミュレーション範囲全体に設定しているため、遭遇車両を含めたシミュレーション内のほとんどの車両がパケットを受信しているからである。しかし、シャドウイングを考慮した環境においては、パケット散布率がつねに 70%以下である。SL-Flooding-Large ではパケットを送信した車両から最も遠い車両のみが中継を行うため、交差点を越えてパケットが中継されることがしばしば発生する。この場合、シャドウイングがある環境では交差点に接続する道路セグメント方向にはパケットを伝搬させることができなため、遭遇車両へのパケット散布率が低下する。

また SL-Flooding-Small は、シャドウイングがない環境

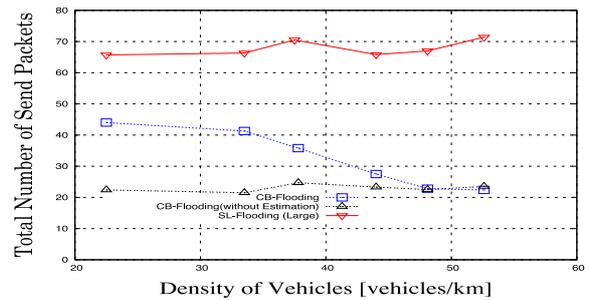


図 9 総パケット送信数

Fig. 9 Total number of send packet.

においても 80%以下のパケット散布率であり、車両密度が低い場合は特に低い。車両密度が小さいと車両の速度が速くなり、遭遇車両が緊急車両の走行経路から離れた位置にも存在するため、走行経路を包含する最小の範囲を散布範囲とする SL-Flooding-Small ではパケット散布率が低下する。車両密度が大きくなるにつれて、遭遇車両が走行経路を包含する最小の範囲に存在する割合が増えるため、散布率が增加する。

なお、本シミュレーションでは、1 km 四方の領域において 1 回のパケット散布により評価を行ったが、接近通知は緊急車両が走行中に複数回送信することも想定している。散布範囲が大きい SL-Flooding (Large) では冗長なパケットがより多く発生するため、これを繰り返せばさらにオーバヘッドが大きくなる。散布範囲の小さい CB-Flooding (without Estimation) と SL-Flooding (Small) では、同一パケットを複数回送することでパケット散布率の向上が見込めるが、指定の散布範囲外に存在する遭遇候補車両に散布されないという本質的な問題があるため、その改善は限定的であると考えられる。したがって、接近通知パケットを複数回送信する場合でも提案手法の優位性は保たれると考える。

4.4 総パケット送信数

図 9 に車両密度を変化させた場合の総パケット送信数を示す。なお、本論文では高パケット散布率を維持しながら総パケット送信数を減らすことを目標としているため、シャドウイングがない環境での CB-Flooding と SL-Flooding-Small と CB-Flooding (without Estimation) を比較した。シャドウイングがある環境での CB-Flooding と CB-Flooding (without Estimation) は、シャドウイングがない場合とほとんど差が見られなかったため、省略した。

CB-Flooding では、車両密度が高くなるにつれて総パケット送信数が大きく減少しているのに対し、CB-Flooding (without Estimation) では車両密度にかかわらずほぼ一定である。これは CB-Flooding が遭遇推定に基づいて散布範囲を制御しているのに対して、CB-Flooding (without Estimation) では送信車両が散布範囲を緊急車両の予定走

行経路と隣接道路セグメントに限定しているからである。

車両密度が低い場合, CB-Flooding は CB-Flooding (without Estimation) より総パケット送信数が多くなっている。これは, CB-Flooding が遭遇推定により, 緊急車両の予定走行経路と隣接道路セグメント以外にも遭遇候補車両があると判断し, より遠くの道路セグメントにパケットを散布しているからである。車両密度が高い場合は, ほぼ同程度の総パケット送信数となっている。これは, 一般車両の平均速度が低下し, CB-Flooding のパケット散布範囲が CB-Flooding (without Estimation) のパケット散布範囲に近づくからである。いずれの場合もパケット散布率は CB-Flooding が上回っており (図 8), CB-Flooding の方が散布範囲を適切に制御できていることが分かる。

SL-Flooding-Large は車両密度にかかわらず, つねに高い総パケット送信数である。SL-Flooding-Large では, 散布範囲をシミュレーションエリア全体と広くとることで散布率を上げているが, その分総パケット送信数がトレードオフで大きくなっている。また, 送信車両があらかじめパケットの散布範囲を決定するため, 車両密度の変化により遭遇車両の存在範囲が救急車両の走行経路周辺に集中したとしても, それに対応することはできない。

以上 2 つの評価項目の結果から, 高いパケット散布率を維持しながら総パケット送信数を抑えている CB-Flooding の有用性を示すことができた。特に, CB-Flooding は車両密度が高く混雑した環境において優位性を示した。

5. おわりに

本論文では, 都市部において緊急車両が円滑に優先通行することを目的とした, 交差点でのパケット伝搬を考慮し, 受信車両が遭遇推定を行うことで中継すべきか否かを自律的に判断して散布範囲を制御する条件ベースフラッディング手法 CB-Flooding を提案した。

CB-Flooding は交差点内の車両を中継させ, さらに緊急車両の走行経路外を走行する車両が遭遇車両推定を行うことで, すべての遭遇車両に接近通知パケットを散布する手法である。CB-Flooding を都市部の環境で車両密度を変化させたシミュレーションにより評価し, 高パケット散布率かつ総パケット送信数を抑えられることを示した。特に, 避讓行動をしにくい車両密度が高い環境では, 総パケット送信数を非常に低く抑えながら 95% 以上のパケット散布率を実現した。

以上より, 都市部の環境下で, CB-Flooding は総パケット送信数を低く抑えながら高いパケット散布率を実現することが確認でき, 本提案の有用性を示した。

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金 (C) 課題番号 21500079 の支援により行われました。交通流シミュレーションによる車両交通データの生成について, 慶應義塾大学先導研究センター松本修一氏に協力をい

ただいた。

参考文献

- [1] 総務省消防庁：消防機関と医療機関の連携のあり方について (参考資料) (2009).
- [2] 守谷 俊, 丹正勝久：救命救急活動の現状, 国際交通安全学会誌, Vol.34, No.3 (2009).
- [3] 株式会社デンソー：緊急車両接近通知システム, 特開 2008-52341 (2006-08-22).
- [4] Yu., G.C.S.: A selective flooding method for propagating emergency messages in vehicle safety communications, *International Conference on Hybrid Information Technology*, Vol.2, pp.556–561 (2006).
- [5] Ko, Y. and Vaidya, N.: Geocasting in mobile ad hoc networks: Location-based multicast algorithms, *Proc. WM-CSA*, pp.101–110 (1999).
- [6] Frey, H.: Scalable geographic routing algorithms for wireless ad hoc networks, *IEEE Network*, Vol.18, No.4, pp.2–6 (2004).
- [7] Tseng, Y.-C., Ni, S.-Y., Chen, Y.-S. and Sheu, J.-P.: The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network, *Wireless Networks*, Vol.8, No.2, pp.153–167 (2002).
- [8] Barolli, L., Durresi, M. and Durresi, A.: Emergency broadcast protocol for inter-vehicle communications, *Proc. 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems*, pp.402–406 (2005).
- [9] Lai, P., Wang, X., Lu, N. and Liu, F.: A Reliable Broadcast Routing Scheme Based on Mobility Prediction for VANET, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.1083–1087 (2009).
- [10] Lochert, C., Mauve, M., Fubler, H. and Hartenstein, H.: Geographic routing in city scenarios, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol.9, No.1, pp.69–72 (2005).
- [11] Lo, K.L., Liao, W.H., Tseng, Y.C. and Sheu, J.P.: Geogrid: A geocasting protocol for mobile ad hoc networks based on grid, *Journal of Internet Technology*, pp.23–32 (2000).
- [12] Maihofer, C., Leinmuller, T. and Schoch, E.: Abiding Geocast: Time-stable Geocast for Ad Hoc Networks, *The 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pp.20–29 (2005).
- [13] Kanda, S., Uchikawa, A., Harada, R. and Shigeno, H.: Implementation and Experiment of Multi-Modal Transmission System for Stable Communication, *The 2nd IEEE Vehicular Networking Conference*, pp.328–335 (2010).
- [14] 南部繁樹, 吉田 傑, 赤羽弘和：プローブデータの分析に基づく救急車への緊急走行支援方策の検討, 国際交通安全学会誌, Vol.34, No.3, pp.309–316 (2009).
- [15] PTVJapan：交通シミュレーションソフト VISSIM, 入手先 (<http://www.ptv-vision.jp/vissim.html>).
- [16] 構造計画研究所：ネットワークシミュレータ QualNet, 入手先 (<http://www4.kke.co.jp/network/products/qualnet/index.html>).



原田 亮 (学生会員)

2010年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科博士前期課程在学中。ITSの研究に従事。



鈴木 理基 (学生会員)

2006年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2008年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。現在、同大学院博士後期課程在学中。ITSの研究に従事。



神田 翔平 (学生会員)

2010年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科博士前期課程在学中。ITSの研究に従事。



重野 寛 (正会員)

1990年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業。1997年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。現在、同大学理工学部准教授。博士(工学)。情報処理学会学会誌編集委員，同論文誌編集委員，同マルチメディアと分散処理

研究会幹事，同モバイルコンピューティングとワイアレス通信研究会運営委員等を歴任。ネットワーク・プロトコル，モバイルコンピューティング，ITS等の研究に従事。著書『コンピュータネットワーク』(オーム社)，『ユビキタスコンピューティング』(オーム社)等。電子情報通信学会，IEEE，ACM各会員。