

車々間通信のためのパケット中継制御方式の提案

茂木 信二[†] テープウィロージャナポン ニワット[†] 堀内 浩規[†]

Proposal on Relay Control Protocol for Inter-Vehicle Communications

Shinji MOTEGI[†], Niwat THEPVILOJANAPONG[†], and Hiroki HORIUCHI[†]

あらまし 交通事故のない安全な社会の実現に向けて、車両が他の車両と通信することで相互の位置をリアルタイムに把握可能とする技術への期待が高まっている。障害物などの影響により隣接車両間でパケットを送受信できない場合、それら車両間に存在する他の車両によってパケット中継を行うことが有効となるものの、中継による新たな通信トラヒックを発生し通信遅延やパケット衝突確率が増加する原因の一つとなる。そこで中継車両数を低減するために、受信したパケットを中継するか否かの判断をパケット受信電力のしきい値や電子地図等の情報に基づいて車両が行う方式が提案されていた。しかしながら、いずれの車両もそれらの情報に該当しないと判断すると、中継が全く行われず、隣接車両の位置を把握できなくなってしまう問題があった。そこで本論文では、車々間通信のための新たなパケット中継方式を提案する。提案方式は新しい車両と出合いたいずれの車両も中継を開始することで従来方式のように全く中継が行われないことを回避する。更に複数の車両による同一パケットの重複中継を検出し停止する手順を導入することで、冗長な通信トラヒックを削減可能とする。また国内の Electronic Toll Collection system (ETC) と同じ周波数帯を用いる車々間通信装置に提案方式を実装し、性能評価を行う。

キーワード 車々間通信, 通信方式, 中継制御, 重複検出, ETC

1. ま え が き

日本国内では 1 日当たり平均 2430 件もの交通事故が発生しており、現代社会が抱える深刻な問題の一つになっている [1]。交通事故類型別で見ると、出会い頭衝突と追突が車両事故全体の約 6 割を占めており、特に出会い頭衝突事故は死亡事故となる割合が高く深刻な事故となっている [1]。

交通事故の低減に資するために安全運転を支援するシステムの研究開発が進められている。一部実用化されている自律型システムと呼ばれるシステムでは、自動車に内蔵された各種センサによって、前方の障害物や前走車との車間、車両の蛇行などを検知し、それらをもとにドライバに警告するなどして安全運転を支援する。ただし同システムはセンサの検知範囲外の危険を検知できないため、出会い頭事故等に対応できないという限界がある。そこで無線通信を利活用することで自律型システムを補完する通信型システムへの期待

が高まっている [2], [3]。通信型システムを使ったアプリケーションとして国内の標準化団体が早期実現するために注力しているアプリケーションの一つは出会い頭衝突事故の低減を図るアプリケーションとなる [4]。そのアプリケーションは、各車両は少なくとも 0.1 秒に 1 回程度の時間間隔で自車の位置や速度等のデータを車々間通信でブロードキャストする。そして隣接車両から受信したデータに基づき必要に応じてドライバに警告を促す。同アプリケーションの実現方法の一つとして、既に日本国内に広く普及している Electronic Toll Collection system (ETC) と同一の周波数帯を利用することも検討されている。

そのようなアプリケーションが動作する道路交通環境は多種多様となり、道路の周辺に存在する家屋や看板をはじめとする様々な物体が無線通信を遮へいし、車両が隣接車両からのパケットを通信できなくなってしまう場合がある。そのような場合、直接通信できない車両の間に存在する他の車両によるパケット中継が有効となる。例えば図 1 で車両 B と C は図中に矢印で示した方向に移動し T 字路に差し掛かっており、その T 字路に車両 A が他の道路から向かっているとす

[†] (株) KDDI 研究所, ふじみ野市
KDDI R & D LABS, Fujimino-shi, 356-8502 Japan

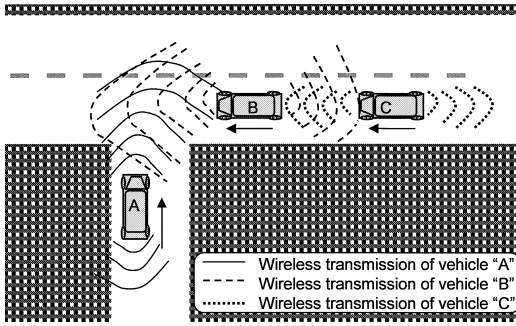


図 1 T 字路付近での無線の伝搬例

Fig. 1 Example of wireless transmissions at T junction.

る．T 字路に差し掛かっている車両 A と B は直接通信できるのに対し，車両 A と C は T 字路付近の障害物によって無線が伝搬せず直接通信できない．そこで車両 B が車両 C と A のそれぞれのパケットを中継することで，車両 A と C は互いの位置や動きを把握可能となる．このようにパケット中継はパケットが受信可能となる地理的範囲を拡大する利点がある一方，中継によって新たな通信トラヒックが発生し，限りある無線通信帯域を利用する中では通信遅延やパケット衝突確率が増加する原因の一つとなる．そこで中継する車両数を削減することでパケット中継による通信トラヒックの増加を抑制する方式として，受信したパケットを中継するか否かの判断を受信電力のしきい値や電子地図等の情報に基づいて自己判断する方式が提案されている [7]～[11]．しかしながら，それらの方式は，いずれの車両も，それらの情報に該当しないと判断すると，中継が全く行われず，隣接車両の位置や動きを把握できなくなってしまう問題がある．

そこで本論文では，車々間通信のための新たなパケット中継方式を提案する．提案方式は，車両が交差点などにおいて新たな車両と出会うと瞬時にパケット中継を開始するとともに，重複する中継を検出し停止する機能によってパケット中継による冗長な通信トラヒックの増加を低減可能とする．更に提案方式の有効性を検証するため，ETC と同一の周波数帯を利用する車々間通信装置に同方式を実装し性能評価する．

以下，2. では車々間通信におけるパケット中継方式に関する従来研究とそれらの問題を述べる．3. で新たな中継制御方式を提案し，4. では実機の車々間通信装置を用いて提案方式の有効性を評価する．最後に，5. でまとめとする．

2. 従来研究とその問題

安全運転を支援する自律型システムを補完する通信型システムでは，車両は，移動する先々で出合った車両と車々間通信を使って瞬時にデータを交換する必要がある．そのため Media Access Control (MAC) には，集中的な制御ではなく，分散的なメディアアクセスが可能な Carrier Sense Multiple Access (CSMA) の利用が適している [2]．CSMA では，各車両はパケットを送信する前に他車両がパケットを送信中であるか否かを周囲の無線状況から判断し，他車両が送信中でなければパケットを送信する．また，隣接車両の位置や動きをリアルタイムに把握するため，時々刻々と変わる位置等のデータを最新に保つことが重要となる．例えば出会い頭衝突の低減に資するアプリケーションが車々間通信に求める要件として，0.1 秒程度の時間間隔で少なくとも 1 回は隣接車両のデータを受信可能とすることがある．そこで受信できる確率を高めるためにパケットの衝突の回避を図る Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) の利用が考えられる．しかしながら，CSMA/CA は隣接車両 1 台 1 台と RTS/CTS/ACK メッセージを交換する必要があり，車両数が増えるとオーバヘッドが大きく通信遅延が増大してしまう．そこで CSMA を使って同じパケットを連続して数回送信することでパケットを受信できる確率を高める方式などが提案されている [2]．

そのようにして MAC を使ってパケットを受信できる確率を高めたとしても道路交通環境は多種多様であり，道路の周辺に存在する家屋や看板などの様々な物体が無線通信を遮へいし，車両が隣接車両からのパケットを通信できなくなってしまう場合がある．その場合，無線が直接伝搬しない車両間に存在する他の車両がパケットを中継することで，パケットを受信できる地理的範囲を拡大することが有効となる．ところが中継することは新たな通信トラヒックの発生を意味し，それは無線通信帯域に限りがある中では通信遅延やパケット衝突確率が増加する原因の一つとなる．

そこで中継する車両数を削減することでパケット中継による通信トラヒックの増加を抑制する方式として，受信したパケットを中継するか否かの判断を車両が受信電力のしきい値や電子地図等の情報に基づいて自己判断する方式（以下，自己判断方式と呼ぶ）が提案されている [7]～[11]．それらの方式は，車両が内部にもつ，例えばパケットの受信履歴や受信電力などの情

報 [7], [8] や電子地図の情報 [9] ~ [11] を中継制御に利用する。前者の情報を使った例えば文献 [8] では、受信したパケットの受信電力が一定のしきい値以下となった車両のみが受信したパケットを中継する。これよりパケットを送信した車両から遠く離れた車両のみがパケット中継し、その結果、中継車両数を低減しつつ遠方の車両がパケットを受信可能となる。後者の電子地図の情報を利用した中継制御方式では、道路の形状や交差点の位置等の電子地図が提供するデータで示される特定位置に自車が位置していると判断した場合のみ受信パケットを中継する。しかしながら、それらの方式は、いずれの車両も、指定されたしきい値や特定位置に該当しないと判断すると、中継が全く行われず、隣接車両の位置や動きを把握できなくなってしまう問題がある。また、電子地図を利用する方式は、電子地図の作成時と利用時とでは数日から数か月以上時間が経過するために部分的に現実と乖離する場合がある、その場合本来行うべき中継が実行されず、隣接車両の位置や動きを把握できなくなってしまう問題がある。

なお、上記のような車両内部の情報とは別に、定期的なメッセージ交換で得た情報を使って最小数の中継車両を自動選択する方式がある [5], [6]。その自動選択は、すべての隣接車両からそれらの隣接車両の識別子のリストを含むメッセージを受信するまで完了しない。そのため中継を瞬時に開始できず、パケット中継によって隣接車両の位置や動きをリアルタイムに把握することが困難となってしまう。

以上、従来の中継制御方式は上記で述べた問題があることから、次章で新たなパケット中継制御方式を提案する。

3. 中継制御方式の提案

車々間通信のための新たなパケット中継制御方式を提案する。提案方式は、車両が交差点などにおいて新たな車両と出会うと瞬時にパケット中継を開始するとともに、冗長な中継を検出し停止する機能によってパケット中継による通信トラヒックの増加を低減可能とする。なお中継を行う回数は 1 回を想定する。

3.1 提案方式の特徴

提案方式は以下に挙げる特徴を有する。

(1) パケット中継の動的な開始と停止

パケット中継を常に行うのではなく車両の状況に応じて動的に開始と停止を行う。具体的には、自車が把握している隣接車両の存在を新たに出会った車両に知

らせるため、新たな車両と出合った場合に自車の隣接車両から受信するパケットの中継を開始する。開始した中継は、その新たに出会った車両と自車の隣接車両が直接通信できることが分かった時点、並びにその出会った車両が通信範囲外に転出した時点で停止する。

それ以外に車両間の無線品質が悪化し直接通信できなくなった場合、それら以外の車両が中継を開始する。なお、直接通信できない原因には、他車両等により電波が遮断されてしまうシャドーイングや車両間の距離が離れたこと等、様々な原因が考えられるが、ここではそれらの原因ごとの対応は行わず、これまで受信していたパケットを受信しなくなったという結果や新たなパケットを受信ようになったという結果のみをパケット中継の開始と停止の制御に利用する。

このように提案方式は基本的に新しい車両と出合ったいずれの車両も中継を開始することで、従来方式のように、いずれの車両もしきい値や特定位置に該当しないために全く中継が行われないことを回避する。

(2) 重複中継検出機能の導入

パケット中継による通信トラヒックの増加を低減するため冗長な中継を検出し停止する機能を導入する。ここで冗長な中継とは、同一のパケットを重複して中継してしまうことを指す。冗長中継は、ある車両に向かって複数の車両が同一のパケットを重複して中継してしまう場合と、自車が一度送信したパケットを隣接車両から受信し、それを再度重複して中継してしまう場合がある。

(3) データを送信するパケットへの制御信号の併合

上記の特長 (1) (2) で述べた中継の開始や停止、そして重複中継の検出を行うための制御信号は、単体で送信するのではなく、各車両が定期的にブロードキャストするパケットのヘッダ部分に併合して送信する。これより制御信号を隣接車両に伝達するための通信トラヒックの抑制を図る。ただし、パケットをブロードキャストした直後に、送信したい制御信号が発生した場合は単体での送信を許容する。

3.2 中継制御方式の概要

新たな車両と出合った場合に自車の隣接車両から受信するパケットの中継を開始する。例えば、図 2 において車両 B, C, D は同一方向に移動しており相互にパケットを受信でき隣接車両として認識しているものとする。車両 B は、T 字路に差し掛かると、他の方向から同じ T 字路に向かっている車両 A からのパケッ

トを受信することで車両 A に出合ったことを検出する．これを契機に車両 B は，自車の隣接車両 C と D から受信したパケットの中継を開始する．また車両 B は隣接車両に新たになった車両 A から受信したパケットの中継を開始する．同様に，車両 C は車両 A と出合ったことを検出し中継を開始する．なお車両 A は車両 B と出会うまで隣接車両が存在しなかったことから，新たに出合った車両 B, C から受信したパケットを中継しても，それを受信する車両が存在しないことを分かっているために中継は開始しない．

車両がパケット中継を開始する際は，重複中継検出のための信号（以下，REP (REPLY)）をパケットに併合する．それを使った重複検知機能については次節で詳細を述べるが，図 2 の場合，車両 A に向かって車両 B と C が D から受信した同一のパケットを重複して中継してしまうことを回避する．例えば車両 B は車両 C と重複する D からのパケットを中継していることを検出すると，そのパケット中継を停止する．

また新たに出合った車両 A が図 2 の T 字路を左折し，車両 B, C, D と同一の進行方向に合流した結果，車両 A 及び D が互いに直接パケットを受信できることが分かると，中継の停止を要求する信号（以下，STP と呼ぶ）を送信し，STP を受信した車両は開始した中継を停止する．これより同一方向に進み相互にパケットを受信できる車両 A, B, C, D は単に自車のパケットを定期的に送信するだけの状態で走行をとにする．

なおパケット中継の停止は，上記で述べた重複するパケット中継を検出したときや STP を受信したときが契機となる．ただし，パケット中継の停止は，その中継を必要とする車両が一つもなくなった時点に行く．その制御は，各車両が管理するリストを用いて行う．具体的には，各車両は，新たに出合った車両や

後述する中継を要求した車両などの中継先の識別子 (request_source_addr) と中継しているパケット内のデータの作成元車両の識別子 (request_addr) の組の一覧となる中継要求元リストを管理する．重複中継の検出時並びに STP を受信時に該当する組をリストから削除し，中継しているパケットに関する組が一つもなくなった時点で，そのパケット中継を停止する．

以上のように新たな車両に出合った場合以外として，車両間の無線品質が悪化し直接通信できなくなった場合に，パケット中継を開始可能とする．無線品質の悪化は隣接車両が定期的に送信するパケットの受信できる割合が小さくなったことや無線の受信電力が小さくなったことなどで容易に検出できる．無線品質の悪化を検出した車両は，自車が定期的に送信しているパケットに中継の開始を要求する信号（以下，REQ (REQest) と呼ぶ）を併合してブロードキャストする．REQ には，中継の要求元 (request_source_addr) と中継を要求するパケットの送信元の車両の識別子 (request_addr) として，自車の識別子と無線品質が悪化した隣接車両の識別子をそれぞれ指定する．その REQ が付加されたパケットを受信した車両は，要求されたパケットを受信している場合，そのパケットの中継を開始する．その際，REQ に対する応答信号 REP を送信パケットに付加する．

3.3 重複中継検出機能の手順

パケット中継による通信トラヒックの増加を低減する重複中継検出機能について，走行シナリオとなる図 2 と図 3，並びにその手順を示した図 4 を使って説明する．図 4 の手順は REP を受信するたびに各車両が実行する．

同一パケットの重複中継には，1) ある車両に向かって複数の車両が同一のパケットを重複して中継してし

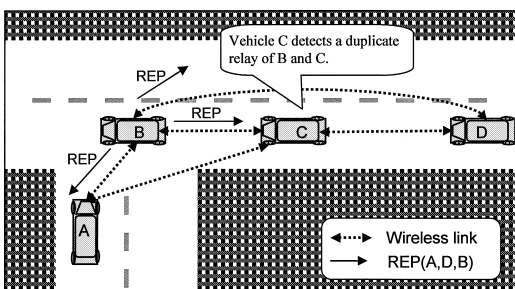


図 2 互いに通信できる場合の重複中継検出例
Fig. 2 Duplicate relay detection by overhearing.

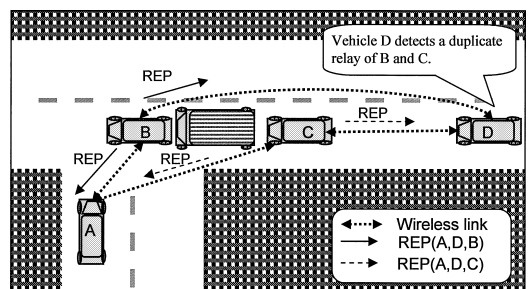


図 3 隠れ端末となる場合の重複中継検出手順
Fig. 3 Duplicate relay detection by upstream vehicle.

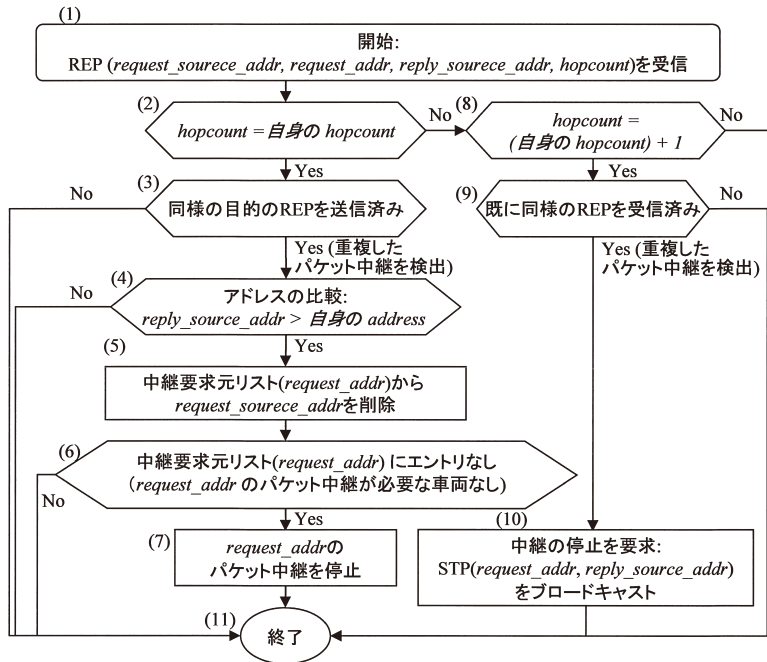


図 4 重複するパケット中継の検出手順
Fig. 4 Procedure of duplicate relay detection algorithm.

まう場合と、2) 自車が一度送信したパケットを隣接車両から受信し、それを再度重複して中継してしまう場合がある。2) は受信したパケットに含まれるデータの作成元の識別子と通し番号の組を利用することで受信したパケットが一度送信したパケットであることを検出し、重複中継を容易に回避できる。以下 1) の重複中継検出を説明する。

重複する中継を行うことになる複数車両の状況には、(1) 互いに通信できる場合と(2) 隠れ端末の位置関係にあり互いに通信できない場合の二つがある。

(1) 互いに通信できる場合の重複中継検出手順

互いに通信できる場合、中継を開始する際にパケットに付加する REP を使って重複中継を検出する。REP には、中継の目的に関する情報が含まれる。具体的には、どの車両のために、どの車両のデータを、どの車両が中継開始するかを示す情報として、それぞれ中継開始の契機となった新たに会った車両の識別子 (request_source_addr)、中継するパケット内のデータの作成元の識別子 (request_addr)、中継を行う車両識別子として自車の識別子 (reply_source_addr) を指定する。なお中継先となる、新たに会った車両が複数となる場合は、request_source_addr の値を変えたパケ

トをそれぞれ送信する。またパケットには、パケット内のデータの作成元からこのパケットを受信した車両までのホップ数 hopcount を含める。REP を応答した車両は、どのパケットの中継をどの車両のために開始したかを記録するため、中継しているパケットのデータの作成元の識別子 (request_addr) と中継パケットの作成元の車両の識別子と中継先となる新たな車両の識別子 (request_source_addr) との組のリスト (以下、中継要求元リストと呼ぶ) を管理する。例えば図 2 の車両 B が、車両 D から受信したパケットを新たに会った車両 A のために中継を開始するとき、車両 B は自身の中継要求元リストに、車両 D と車両 A の識別子の組を追加する。このようにパケット中継の目的に関する情報を含む REP を他の車両から受信したときに、他の車両の中継の目的が自車の開始する中継の目的と一致するか否かを確認することで、重複したパケット中継を検出できる。例えば図 2 で車両 B は新たに会った車両 A のために、車両 D のパケット中継を開始する例を用いて説明する。車両 B は CSMA を使って他の車両が無線送信していないことを確認できると、新たに会った車両の識別子 (request_source_addr) として“A”，中継するパケット内のデータの作成元の識別

子 (request_addr) として “D” を含む REP をパケットに併合してブロードキャストする。車両 B は自身の中継要求元リストに “D と A の組” を追加する。その後、車両 C も同様に新たに出会った車両 A のために車両 D のパケット中継を開始しようとする。そこで車両 C は (request_source_addr:A, request_addr:D) を含む REP をパケットに併合してブロードキャストする。車両 B は車両 C からの REP を受信すると (図 4(1)), その REP を送信した車両のホップ数 hopcount が、自身と同じか否かを判断する (図 4(2))。同じ場合、図 2 の車両 B と C のように、中継するパケット内のデータの作成元 D からのホップ数が同じ車両同士が直接受信した REP を使って重複中継を検出する手順に進む (図 4(3) 以降の手順)。受信した REP に含まれる (request_source_addr:A, request_addr:D) が示すパケット中継の目的と自身が送信済みの REP の目的が一致することを確認し (図 4(3)), 例えばそれら車両間で識別子の小さい車両 B が A のためのパケット中継は停止し、重複中継を回避する。ここで車両 A のためのパケット中継を停止するとは、車両が自身の中継要求元リストから車両 A を取り除くことを意味する (図 4(5))。その結果、中継しているパケットに対する中継要求元リストが空になったのならば車両 D のパケットの中継を必要とする車両が存在しないことから、車両 D から受信したパケットの中継を停止する (図 4(6))。

(2) 隠れ端末となる場合の重複中継検出手順

上記 (1) の重複中継検出手順は中継する車両が、互いに無線通信範囲にある場合には対応できるが、隠れ端末となる隠れ端末の位置関係となる場合には相互に REP を受信することができないことから対応することができない (図 3)。図 3 の例では、車両 B と D 間は通信可能であるが、車両 B と C 間は無線品質の悪化により通信が困難となる場合を仮定している。このような場合は、車両 B と C が中継しているパケットの作成、送信元となる上流の車両 D が重複を検出することで対処する。自車が上流の車両となっているか否かは受信した REP 内のホップ数 hopcount を確認することで容易に判断できる (図 4(2), (8))。具体的には、上流の車両 D は、車両 B と C の双方から同じ目的の REP を受信することで重複した中継を検出する (図 4(9))。車両 D は重複した中継を検出すると、中継の停止を要求する信号 STP を送信パケットに併合してブロードキャストする (図 4(10))。STP には、

1. 中継開始
 - 1-1. 新たな車両からパケットを受信 (新たな受信車両両端が出現)
 - ⇒中継パケットの作成元の車両それぞれの識別子と新たな車両の識別子との各組み合わせを、中継要求元リストに追加。(中継するパケットとは、この車両が受信しているパケットの中で一度も中継されていないもの(ホップ数で判断))
 - ⇒REP を送信。(※1 未送信パケットかつ制御信号(REQ, REP, STP)が付加されていないパケットがあるならば、そのパケットのヘッダに REP の情報を付加して送信。そのようなパケットがないならば、REP 単体で送信)
 - 1-2. REQ を受信
 - ⇒中継パケットの作成元の車両それぞれの識別子と REQ の送信元車両の識別子との各組み合わせを、中継要求元リストに追加。
 - ⇒REP を送信。(※1 と同様にして送信)
2. 中継停止
 - 2-1. 重複中継検出時
 - (a) 直接的な検出時 (他車両の REP 受信時)・・・同一パケットを中継する他車両が存在する場合
 - ⇒重複と判断した中継を示す、中継パケットの作成元の車両の識別子と中継先の車両の識別子の組を、中継要求元リストから削除。他の中継先の組が残っている限り、中継は停止しない。
 - (b) 間接的な検出時 (STP 受信時)・・・中継車両どうしが隠れ端末関係の場合
 - ⇒STP が要求している中継を示す、中継パケットの作成元の車両の識別子と中継先の車両の識別子の組を、中継要求元リストから削除。他の中継先の組が残っている限り、中継は停止しない。
 - 2-2. 直接通信可能となった時
 - ⇒中継先の車両が直接通信可能となった時点で送信した STP を受信すると、その STP が要求している中継を示す、中継パケットの作成元の車両の識別子と中継先の車両の識別子の組を、中継要求元リストから削除。他の中継先の組が残っている限り、中継は停止しない。
 - 2-3. 中継先が通信範囲外へ移動時
 - ⇒中継先車両からのパケットが受信できなくなった場合、中継要求元リストから直ちに削除。
3. 中継の要求
 - ⇒直接通信できなくなった場合に、REQ を送信。(※1 と同様にして送信)
4. 中継の停止の要求
 - (a) 直接的な検出時
 - ⇒中継により受信していたパケットが直接受信可能になった場合 (受信パケットのホップ数で判断)、STP を送信。(※1 と同様にして送信)
 - (b) 間接的な検出時
 - ⇒複数の他車両が同一パケットを中継している場合 (受信 REP で判断)、STP を送信。(※1 と同様にして送信)

図 5 パケット中継制御の動作
Fig. 5 Process of packet relay.

識別子の大小関係などに基づいて、停止を要求するいずれか一方の識別子を指定する。

これまで述べたパケット中継制御にかかわる全体の動作をまとめたものを図 5 に示す。

4. 性能評価

4.1 評価環境

提案方式の有効性を評価するため、実機の車々間通

信装置に提案方式を実装した。その車々間通信装置は、車両への装着率が進んでいる ETC と同様の 5.8 GHz 帯を用い、MAC 層には CSMA を用いる。通信速度は 4 Mbit/s 程度である。装置が定期的にブロードキャストするパケットのサイズは 504 バイトとした。パケットは、MAC 層のヘッダ、提案方式に基づき中継制御を担うネットワーク層のヘッダ、並びにアプリケーション層のデータで構成する。MAC 層のヘッダは合計 6 バイトであり、パケット長 (2 バイト)、REQ や REP 等のパケット種別 (1 バイト)、中継回数 (1 バイト)、通し番号 (1 バイト)、予備 (1 バイト) を格納するフィールドで構成する (括弧内は情報量を示す)。ネットワーク層のヘッダは合計 10 バイトであり、request_source_addr (2 バイト)、request_addr (2 バイト)、reply_source_addr (2 バイト)、hopcount (1 バイト)、予備 (1 バイト) の情報を格納するフィールドで構成する。本評価で用いるヘッダのフィールドの種類とフィールドの情報量は、標準化団体がまとめたガイドライン [12] に即したものにした。なおアプリケーションのデータの情報は 350 バイトとした。この情報は同ガイドラインが現時点で想定している 80 バイトよりも大きい値となるが、同標準化団体がアプリケーションのデータについて継続検討しており、今後情報量が増加する可能性も考慮して大きい値を本評価では用いた。また残りの 96 バイトは無線通信の誤り訂正に用いる情報となる。

本評価は提案方式の基本的な性能を明らかにするため、外乱のない屋内の電波無響室で図 6 のように装置を配置して行った。図 6 の装置 A と B には無線減衰器を取り付けることで無線の受信強度を十分に小さくし、パケットが相互に受信できない構成とした。装置 A 並びに B の間には、それらのパケットを中継する候補となる装置 C, D, E を配置した。また、車両が新たな車両に出会う状況は擬似的に作成した。具体的

は、装置 B, C, D, E をあらかじめ起動しパケットの定期的な送信を始めることで互いに隣接車両として認識させ、そこに装置 A の起動を外部から操作することで装置 C, D, E が新たに車両 A と出会う状況を作った。

性能を計るための指標は通信トラヒックと通信遅延とした。ここで通信トラヒックは、装置 A と装置 D の間に配置した計測ツールが受信したパケット数から求めた単位時間当りに受信するデータ量 (Mbit/s) とした。また、通信遅延は、装置が自身の作成データを含むパケットを送信してから、そのパケットを受信するまでの時間とした。例えば、装置 A と B 間の通信遅延は、装置 A が自身の作成データを含むパケットをブロードキャストした時刻から、装置 C 等の中継を経て装置 B がそのパケットを受信するまでの時刻とした。上記の性能指標の観点からパケットをブロードキャストする時間間隔 (以下、パケット送信周期と呼ぶ) と中継の候補となる装置数を変えて評価を行った。

なお、受信したパケットが、自身の送信パケットとなる場合以外は受信パケットを中継する文献 [7] で提案されている中継制御を CSMA 上で実行する従来方式と比較評価した。それ以外の従来方式は、本来行うべき中継が全く行われなくなってしまう本質的な問題があるため比較の対象とはしなかった。なお従来方式と提案方式では、実機の車々間通信装置への実装形態が若干異なる。具体的には、従来方式は受信したパケットをとにかく中継するのみの処理であることから、その処理を車々間通信装置の MAC 層に実装した。これに対し提案方式は、受信したパケットは、MAC 層よりも一つ上位のネットワーク層までもち上げて、そこで中継するか否かを判断し、中継すると判断された場合は再度 MAC 層を経由して送信する実装とした。

また実機の車々間通信装置を用いた本評価は提案方式の基本性能を評価することはできるものの、車両台数が増えた場合や車両が移動した場合等、提案方式が使われる実際の条件下を踏まえた評価を行うことはできない。そこで本基本評価とは別に道路環境や車々間通信装置をモデル化したシミュレーション評価も行っている [13]。そこでは実際の道路環境を想定して道路網や信号機の動き等をモデル化した 25 キロメートル四方の都市を作成し、その中を 2061 台の車両が日本の交通規則に従って移動する。シミュレーション結果は、提案方式パケット中継による通信トラヒックの増加を低減可能とする有効性を示している。

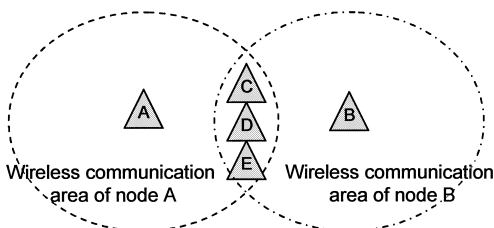


図 6 評価に用いた車々間通信装置の配置構成
Fig. 6 Node arrangement of evaluations.

4.2 評価結果

図7はパケット送信周期と通信トラヒックの評価結果を示す。中継の候補となる装置数は3とした。提案方式は、いずれのパケット送信周期においても従来方式に比べ通信トラヒックを低減している。これは、従来方式は中継の候補となる三つの装置 C, D, E のすべてが装置 A と B から受信したパケットを中継したのに対し、提案方式は重複中継検出機能によって一つの装置の中継となったためである。また図8は通信遅延の評価結果を示す。縦軸の目盛りの最大値100ミリ秒は、出会い頭衝突事故の低減を図るアプリケーションが許容する最大の通信遅延0.1秒となる。提案方式は従来方式に比べ通信遅延が大きいもののその差はわずかであり、アプリケーション要件よりも十分に小さく実用的な性能を得ている。なお通信トラヒック

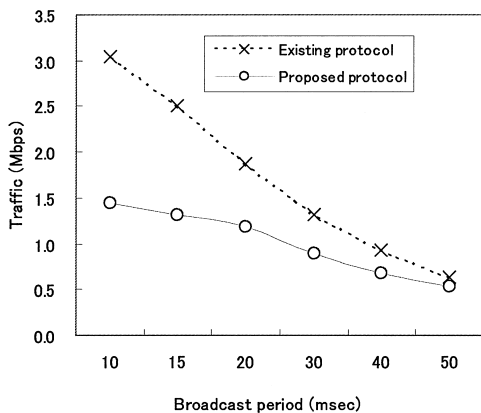


図7 パケット送信周期と通信トラヒック

Fig. 7 Broadcast period and communication traffic.

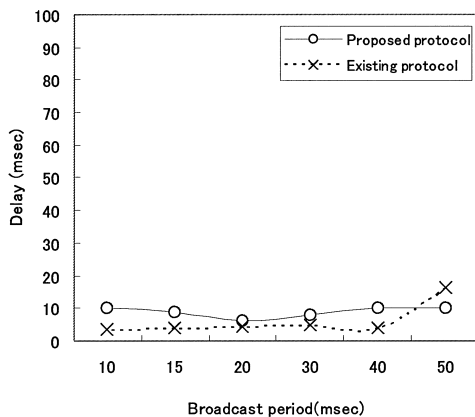


図8 パケット送信周期と通信遅延

Fig. 8 Broadcast period and communication delay.

が増加しても通信遅延がほぼ一定となっている理由として、本評価で用いた車両台数程度での通信トラヒックでは、無線が非常に混雑しパケットの送信待ちとなる確率が少なく通信遅延への影響は小さかったことが理由の一つとして考えられる。また図8の評価結果で従来方式の通信遅延と提案方式の通信遅延とに差が生じたのは、従来方式と提案方式のそれぞれの実装に依存するものと考えられる。具体的には、従来方式は、受信したパケットをとにかく中継するのみの処理であることから、その処理を車々間通信装置のMAC層に実装している。これに対して、提案方式は、受信したパケットは、MAC層よりも一つ上位のネットワーク層までもち上げて、そこで中継するか否かを判断し、中継すると判断された場合に、再度MAC層を経由して送信されることになることから、従来方式に比べ通信遅延がわずかに大きくなったと考えられる。

図9はパケット送信周期とパケット損失率の評価結果を示す。パケット損失率は、あらかじめ全装置に共通の値として設定した送信パケット数に対し、受信できなかったパケット数の割合とした。図9は全装置の平均値を示している。この結果は、提案方式によってパケット中継による通信トラヒックの増加を低減すること、それはパケット衝突確率の低減に大きく寄与することを示唆している。極めて短い送信周期では両方式ともパケット損失率は大きい、アプリケーションが要求する0.1秒程度の時間間隔でのデータ受信の実現に十分と考えられる30~50msの送信周期では提案方式は十分に小さいパケット損失率を達成している。

図10は中継の候補となる装置数と通信トラヒック

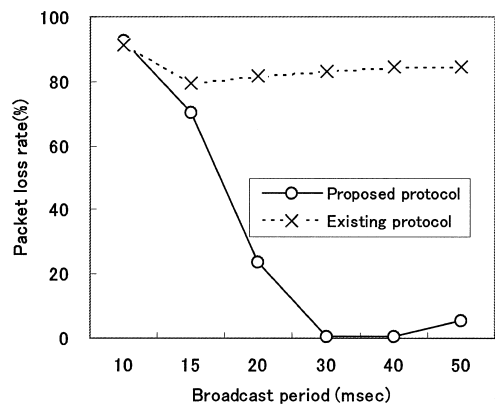


図9 パケット送信周期とパケット損失率

Fig. 9 Broadcast period and packet loss rate.

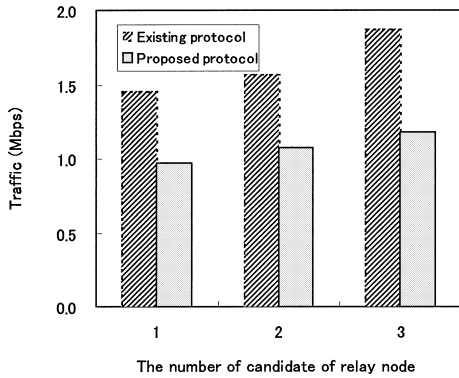


図 10 中継候補の装置数と通信トラフィック

Fig. 10 The number of candidate of relay nodes and communication traffic.

の関係である。パケット送信周期は 50 packet/s としている。従来方式は中継の候補となる複数装置 B のどれもがパケットを中継することになる。そのため、中継候補となる装置数が増えるに伴い通信トラフィックが増加する割合も大きくなってしまっている。それに対し提案方式は、中継候補となる装置が複数であっても重複したパケット中継を回避することが可能であり、実際に中継を行うことになるのは一つの装置のみとなる。そのため中継候補となる装置数が増えても通信トラフィックが増加する割合は小さい。なお、提案方式において、中継候補となる装置数を増やしたときの通信トラフィックの増加分は、追加した装置自信が送信するパケット送信による増分のみである。

以上から提案方式は、パケット中継による通信トラフィックの増加を低減可能であり、その結果パケット衝突確率の低減が可能となることから、有効といえる。

5. む す び

本論文では、車々間通信のための新たなパケット中継制御方式を提案した。従来、受信したパケットを中継するか否かの判断を受信電力のしきい値や電子地図等の情報に基づいて行う方式が提案されていた。しかしながら、いずれの車両もそれら情報に該当しないと判断すると、中継が全く行われず、隣接車両の位置や動きを把握できなくなってしまう問題があった。

そこで提案方式は新しい車両と出合ったいずれの車両も中継を開始することで、従来方式のように全く中継が行われなくなってしまうことを回避した。更に、すべての車両が中継すると、ある車両に向かって複数の車両が同一のパケットを重複して中継してしまうた

め、そのような重複中継を検出し停止する機能を導入した。

また提案方式の有効性を評価するため、ETC と同様の 5.8 GHz 帯を用いる車々間通信装置に提案方式を実装し、通信トラフィックと通信遅延の観点から基本的な性能評価を行った。その結果、提案方式はパケット中継による通信トラフィックの増加を低減するとともに通信遅延も実用的な性能を得ており、提案方式の有効性を確認した。

今後の課題としては、車々間通信装置を搭載した複数車両を実際の道路網を走行させて実証実験を行い、実環境における提案方式の性能評価とそこで得られた知見を方式にフィードバックすることがある。更に、数千台から数万台規模の車両の走行とそれらの車々間通信をモデル化したシミュレーションを行うことで、車々間通信が 5.8 GHz 帯を用いる場合の通信収容台数等を明らかにすることがある。また、車両同士の交通事故のみならず、人と車両間の交通事故の低減に向けて、例えば人がもつ携帯電話と車両間の通信制御方式の確立が課題となる。

謝辞 日ごろ御指導頂く(株)KDDI 研究所秋葉所長並びに鈴木執行役員に感謝する。本研究は、NICT からの受託研究「コビキタス ITS の研究開発」の成果である。

文 献

- [1] 警視庁交通局, “平成 18 年中の交通事故の発生状況,” 2007 年 2 月 23 日, <http://www.npa.go.jp/toukei/koutuu41/20070228.pdf>
- [2] K. Tokuda, M. Akiyama, and H. Fujii, “DOLPHIN for inter-vehicle communications system,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.504–509, Oct. 2000.
- [3] S. Motegi and H. Horiuchi, “Relay control for data dissemination of spontaneous vehicular networks,” Proc. 6th International Conference on ITS Telecommunications (ITST’06), pp.1098–1101, June 2006.
- [4] ITS 情報通信システム推進会議 車々間通信システム専門委員会, <http://www.itsforum.gr.jp>
- [5] T. Clausen and P. Jacquet, “Optimized link state routing protocol (OLSR),” Request for Comments (Experimental) 3626, Internet Engineering Task Force, Oct. 2003.
- [6] F. Dai and J. Wu, “An extended localized algorithm for connected dominating set formation in ad hoc wireless networks,” IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., vol.15, no.10, pp.908–920, 2004.
- [7] L.B. Michael and M. Nakagawa, “Non-platoon inter-vehicle communication using multiple hops,” IEICE Trans. Commun., vol.E82-B, no.10, pp.1651–1658,

Oct. 1999.

- [8] 島津義嗣, 村田英一, 吉田 進, “ITS 車々間通信における自律的パケット中継制御法,” 信学論 (B), vol.J82-B, no.11, pp.2018–2025, Nov. 1999.
- [9] M.K. Cheng and K. Rajan, “A digital map/GPS based routing and addressing scheme for wireless ad-hoc networks,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.17–20, June 2003.
- [10] C. Schwingenschlogl and T. Kosch, “Geocast enhancements of AODV for vehicular networks,” ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, vol.6, no.3, pp.96–97, July 2002.
- [11] J. Tian, L. Han, K. Rothermel, and C. Cseh, “Spatially aware packet routing for mobile ad hoc inter-vehicle radio networks,” Proc. Intelligent Transportation Systems Conference, pp.1546–1551, Oct. 2003.
- [12] ITS 情報通信システム推進会議 車々間通信システム専門委員会, “5.8 GHz を用いた車々間通信システムの実験用ガイドライン (RC-005 1.0),” <http://www.itsforum.gr.jp/>
- [13] N. Thepvilajanapong, S. Motegi, and H. Horiuchi, “Performance evaluation of protocols for inter-vehicle communications,” IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.931–937, June 2007.

(平成 19 年 4 月 5 日受付, 7 月 30 日再受付)



堀内 浩規 (正員)

昭 58 名大・工・電気卒。昭 60 同大学院情報工学専攻修士課程了。同年, 国際電信電話(株)(現 KDDI(株))入社。現在, KDDI 研究所執行役員・工博。この間, 通信プロトコル, ネットワーク管理, 分散処理, ITS, NGN の研究に従事。本会平 4 年度学術奨励賞, 情報処理学会平 8 年度, 平 12 年度全国大会優秀賞並びに国際会議 ITST2006 Best Paper Award を各受賞。



茂木 信二 (正員)

平 9 筑波大・第三学群・基礎工学類卒。
平 11 同大学院工学研究科物理工学専攻修士課程了。同年, KDD (株)(現 KDDI(株))入社。平 18 大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻博士後期課程了。情報科学博士。入社以来, 通信プロトコル, 無線マルチホップネットワークング, ITS, 分散処理に関する研究に従事。本会平 15 年度学術奨励賞, 平 17 第 4 回情報科学技術フォーラムヤングリサーチ賞, 情報処理学会第 68 回全国大会大会優秀賞, 国際会議 ITST2006 Best Paper Award を各受賞。



テープウィロージャナボン ニワット

平 11 チュラロンコーン大・工・電気卒。
平 15 東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻修士課程了。平 18 同大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻博士課程了。情報理工学博士。同年 (株) KDDI 研究所入社。入社以来, 通信プロトコル, ITS, センサネットワークに関する研究に従事。