

車車間通信における MM-SA パケット転送手法

シャグダル・オユーンチメグ 大山卓 マハダド・ヌリシラジ 湯素華 鈴木龍太郎 小花貞夫

ATR 適応コミュニケーション研究所 〒619-0288 京都「けいはんな学研都市」光台 2-2-2

E-mail: {oyunaa, ohyama, shirazi, shtang, ryutaro.suzuki, obana}@atr.jp

あらまし 分散型無線通信における代表的なチャネルアクセス手法は CSMA/CA である。しかし、CSMA/CA は分散型ネットワークに容易に適用できるという利点をもつ反面、端末数の増加に伴って通信の信頼性が著しく悪化するという問題を抱える。一方、安全運転支援を目的とする車車間通信には、車両台数に依存しない高信頼、低遅延特性が要求される。そこで、我々は CDMA をベースとした MM-SA (Multi-Carrier Multi-Code Spread Aloha) 車車間通信技術、そのシステムの開発を進めてきた。MM-SA におけるチャネルアクセス手法は、車両台数に依存せず近隣車両間での高信頼、低遅延の通信を確保できるという特徴をもつ。しかし、車車間通信において重要なアプリケーションである出会い頭衝突防止、右折時衝突防止等のシナリオにおいて、任意の車両の位置情報を比較的離れている車両にも伝える必要が生じる。そこで、我々は見通しの悪い環境においても必要とされる車両間での高信頼、低遅延通信を実現する MM-SA パケット転送手法を提案し、本稿では、提案手法の特性をシミュレーションにより評価し、その結果を紹介する。シミュレーション結果から、提案方式は CSMA/CA ベース転送方式に比べてパケット到達率を 20% 以上、遅延特性を 15 ミリ秒以上の短縮できることを確認し、現在検討が進められている車車間通信の出会い頭衝突防止アプリケーションの要件をほぼ 100% 満足できることを示した。

キーワード 車車間通信, CDMA, CSMA/CA, パケット転送

MM-SA Packet Forwarding Scheme for Inter-Vehicle Communications

Oyunchimeg SHAGDAR, Takashi OHYAMA, Mehdad N. SHIRAZI, Suhua TANG, Ryutaro SUZUKI,
and Sadao OBANA

ATR Adaptive Communications Research Laboratories,

2-2-2, Hikaridai "Keihanna Science City", Kyoto, 619-0288 Japan

E-mail: {oyunaa, ohyama, shirazi, shtang, ryutaro.suzuki, obana}@atr.jp

Abstract. CSMA/CA is considered as the de-facto channel access scheme for distributed communications. However, in CSMA/CA, reliability performance degrades with the increase of the number of nodes. On the other hand, although communication range of CDMA is much smaller compared to that of CSMA/CA, CDMA can ensure reliable communication between neighboring nodes. This reason motivates our research and development activities on MM-SA (Multi-Carrier Multi-Code) inter-vehicle communication system that can achieve reliable and fast communication between neighboring vehicles. However, in some scenarios, such as preventing crossing collisions, position information of a vehicle has to be transmitted to vehicle(s), which is relatively far. This paper introduces an MM-SA-based packet forwarding scheme that can be applied to the target scenarios. Simulation results show that, compared to an CSMA/CA-based forwarding scheme, the proposed scheme improves packet delivery ratio by 20% and reduces forwarding latency by larger than 15 milliseconds.

Keyword Inter-vehicle communications, CDMA, CSMA/CA, packet forwarding.

1. はじめに

走行中の車両同士が直接通信を行う車車間通信はインフラを必要とせず、安全運転支援が可能な通信手段として大きな関心を集めている。近年行われている車車間通信に関する研究活動の多く [1-4] が Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) チャネルアクセス手法 [5] を想定している。CSMA/CA はユーザ間での厳密なスケジューリングを必要としないため、分散型通信に容易に適用できるが、端末数が増大すると通信の信頼性、遅延特性が著しく悪化する欠点をもつ [6-7]。

分散型無線通信で適用できるもう一つのチャネルアクセス手法は Code Division Multiple Access (CDMA) である。CDMA は複数の端末の同時通信を許すため、チャネルアクセス遅延特性が非常に優れた手法であるが、近いユーザからの干渉により遠いユーザからの信号を正しく受信できないという遠近効果が分散型ネットワークへの適用を妨げる課題とされてきた。しかし、遠近効果は、近隣端末間で確実に通信ができるという特徴ももたらす [9]。車車間ネットワークにおいて、位置情報、緊急情報の配布が主な通信であり、殆どの通信はブロードキャスト方式で行われ、メッシュネットワーク、センサーネットワークなどのその他の分散型ネットワークにおける通信とは大きく異なる。従って、車車間通信において、近い車両からの情報に比べて遠い車両からの情報がより重要とはならず、遠近効果は車車間アプリケーションに有利な特性をもたらすとも考えられる。そこで、我々は CDMA をベースとした MM-SA (Multi-Carrier Multi-Code Spread Aloha) 車車間通信技術、そのシステムの開発を進めてきた [6-11]。

車車間通信において重要なアプリケーションである出会い頭衝突防止、右折時衝突防止シナリオを想定した場合、建物等の遮へいにより見通しの悪い環境における車両間での通信の実現が要求される [12-14]。直接通信が不可能な車両間での通信の実現はパケット転送の導入を必要とするが、ブロードキャストパケットのマルチホップ転送は、チャネルの干渉量を増大させてしまい、通信の信頼性の悪化が問題となる。さらに、転送処理において自己干渉、遠近効果が悪影響を与える場合も生じる。そこで、我々は自己干渉、遠近効果を適切に制御しながらパケット転送を実現する MM-SA パケット転送手法を提案し、本稿ではシミュレーション評価によりその効果を示す。本稿の構成は以下である。2 章では、MM-SA 車車間通信システムの基本仕様を示し、出会い頭衝突防止のための研究課題を説明する。3 章において出会い頭衝突防止を想定において必要とされる車両間での通信の高信頼化、低遅延特化を図るエリアベースパケット転送機能、および自己干渉、遠近効果を適切に制御する送信タイミング制御機能を説明する。4 章において MM-SA パケット転送方式の特性をシミュレーションにより評価し、さらに CSMA/CA をベースとする転送方式との特性と比較する。最後に、5 章で本稿をまとめる。

2. MM-SA システムの概要

MM-SA 車車間通信システムは複数周波数チャネルおよび複数拡散符号を組み合わせて用いるシステムであり、下記の仕様をもつ。

- 5.8GHz 周波数帯を使用する。
- 複数の波数チャネルを同時利用でき、全ての周波数チャネルでパケット同時受信が可能である。本稿では周波数チャネル数を 4 とする。
- 各々の周波数チャネルにおいて拡散符号数だけマッチドフィルタをもち、異なる拡散コードで拡散された信号を同時受信できる。これにより、ユーザ毎の拡散コード割当制御を必要としない。
- タイミング同期を必要としない Gold コードを利用する。各端末はパケットを送信時点で、任意の拡散コードをランダムに選択、使用するものとする。

ここで上記の基本仕様をもつ MM-SA 車車間システムにおいて、出会い頭衝突防止アプリケーションを想定した場合における研究課題を説明する。出会い頭衝突防止のためには、図 1 に示すように優先道路を走行している車両 B に位置移動情報を非優先道路に停止中の車両 A に伝える必要がある [14]。本シナリオにおいて送信エリアを交差点から 90 メートルの領域とし、受信エリアを交差点道路側端から 17 メートルの領域とした。

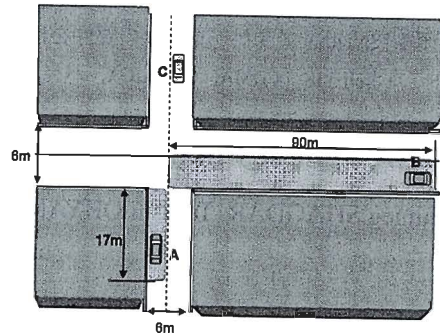


図 1. 出会い頭衝突回避

図 2 は、地面および建物の反射を考慮して計算された車両 A における車両 B の受信電力を示す。図の横軸は、車両 B の位置つまり、車両 B の交差点中心からの距離を示す。ここで、送信電力は 10mW、アンテナの高さは 1.5m である。さらに、同図における干渉波電力は、車両 A と同一道路に位置する C からの受信電力を示す。尚、車両 A と C 間の距離は 90m である。図 2 に示す受信電力特性から下記の問題が課題となる。

- 1) 受信車両と同一道路に位置する車両からの干渉波電力は所望波電力に比べて非常に高い。従って、車両 C 以外の車両が車両 A と同一道路に位置する場合、トータルの干渉電力が大幅に増大し、このような干渉により所望波を正しく受信できないことが容易に想定できる。我々は、上記の問題を回避するために 3.1 節で説明する車両の移

動方向に基づく周波数チャネル割当機能を検討した。

- 2) 交差点中心と車両 B の距離が大きいくほど所望波の受信電力が著しく低く、システムの受信感度を、例えば -94.5dBm として場合に、十数メートルの地点以降は受信感度を下回る。この問題はパケット転送を要求する最も大きな原因である。我々は、情報配布が必要とされる領域でのみパケット転送を行うエリアベースパケット転送機能、マルチホップ転送において発生する干渉を適切に制御するための送信タイミング制御機能を提案した。3.2~3.3 節においてこれらの手法を説明する。

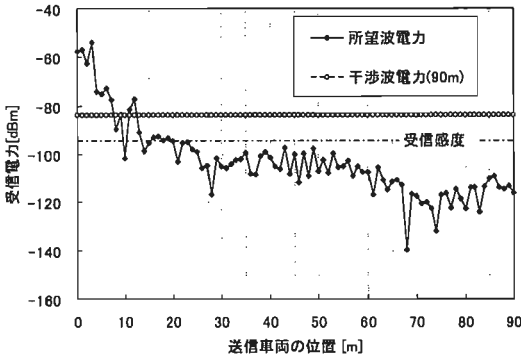


図 2. 車両 A における受信電力

3. MM-SA パケット転送方式

本章において、MM-SA パケット転送における周波数チャネル割当機能、エリアベースパケット転送機能、さらに自己干渉および遠近効果を適切に制御するための送信タイミング制御機能を説明する。

3.1. 周波数チャネル割当機能

受信車両から見通しの良い位置にある車両からの干渉を回避し、見通しの悪い位置にいる車両からの信号を正しく受信できる環境を整えるため、車両の移動方向に基づくチャネル割当機能を検討した。本機能において、例えば、図 3a) で示すように、車両の移動方向が北方向またはそれより左右 45 度範囲以内であれば、例えば周波数チャネル f4 を用いてパケットを送信するものである。同様な方法でその他の周波数チャネルの割当が定められる。上記のルールに従うと、図 3b) で示す車両は周波数チャネル f4 を用いてパケットを送信することになる。

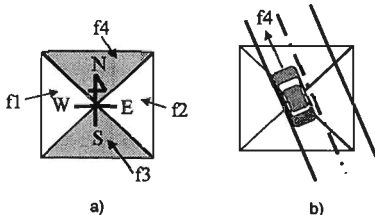


図 3. 周波数チャネル割当機能

3.2. エリアベースパケット転送機能

一般的にブロードキャストパケットの転送はネットワークに大量の干渉を与え、通信の信頼性を悪化させる恐れがある。そこで、必要とされる領域でのみ位置情報パケットの転送を行うエリアベース転送機能を検討した。具体的には、任意の車両の位置情報パケットは、その車両の位置に基づいて設定された転送エリア（例えば前方 100 メートル、横 5 メートル）に位置する車両によってのみ転送される。さらに、転送条件として、車両の移動方向を考慮する条件も加えた。図 4 は転送エリアと車両の移動方向に基づいた転送車両の特定様子を表す。同図におけるパケット転送条件は、転送エリアが送信車両の前方 100 メートル、横 5 メートルとし、さらに転送車両は送信車両と同一移動方向であるという条件が加えられた場合である。同図が示すように、車両⑥~⑧は転送エリア外に位置するため、車両①のパケットを転送しない。また、車両⑨は転送エリア内に位置するが、移動方向が車両①の移動方向と異なるため車両①のパケットを転送しない。従って、転送条件を全て満足する車両②~⑤が送信車両①からのパケットを転送することになる。

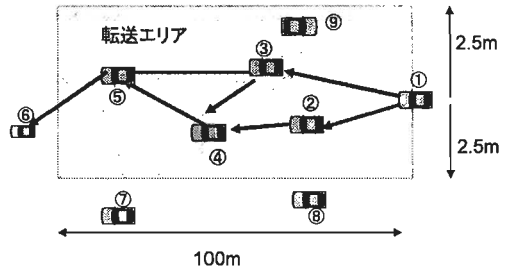


図 4. エリアベースパケット転送機能

ブロードキャストパケットの転送において、任意の車両は同一の情報に複数回受信する場合がある。例えば、図 3 において、車両④は車両②と車両③から車両①の位置情報を受信する。この場合、車両④はこれらのパケットを全て転送するとネットワークに不必要な干渉を与えることとなる。そこで、本転送機能において、パケットを重複して転送しないように、重複パケットの破棄機能を導入する。さらに、位置情報の信頼性の確保のため、位置情報の配布における遅延は 100 ミリ秒以下であることが要求されている。そこで、本転送方式において、生成されてから一定時間以上（たとえば 100 ミリ秒以上）経過した位置情報は転送しないよう、古いパケットの破棄機能を導入する。

図 5 は上記で説明した各機能を反映させたパケット転送アルゴリズムのフローチャートである。

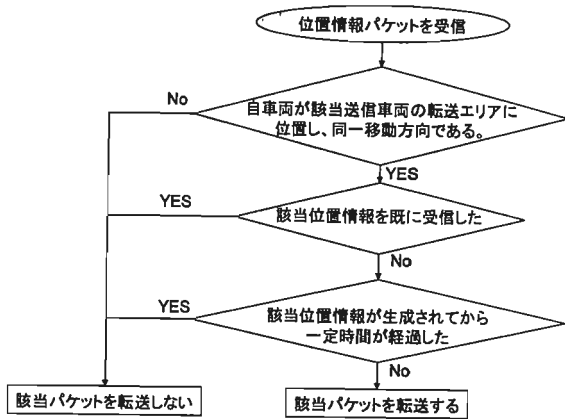


図5. MM-SA パケット転送アルゴリズム

3.3. 送信タイミング制御機能

MM-SA システムは複数の車両が同時にパケットを送信することを許すため、自己干渉および遠近効果にその性能が大きく左右される。例えば、図4において、車両①がパケットを送信する同時時間帯で車両②もパケットを送信する場合、車両②は自己干渉により車両①からのパケットを正しく受信できない。更に、車両③は車両①に比べてより近い車両②からの干渉により車両①からのパケットを正しく受信できない可能性がある。この場合、車両②も車両③も車両①のパケットを受信できないため、車両①の位置情報が配布されない。上記から分かるように、MM-SA 通信において自己干渉、遠近効果により、近い車両によるパケット転送が成功しなければ、遠い車両によるパケット転送は成功しない。そこで、自己干渉および遠近効果を適切に制御し、近い車両同士間でパケットの送受信が正しく行われるように、送信タイミング制御機能を導入する。具体的には、任意の車両は、その直前の車両における位置情報パケットの生成、送信タイミングより $C \times \Delta Tx$ 時間後に自身の位置情報パケットを生成、送信する。ここで、 C は2以上の定数であり、 ΔTx はシステム内の処理時間を含むパケットの送信時間である。例えば、 C を3、 ΔTx を2ミリ秒とすると、各車両が100ミリ秒周期で位置情報パケットを生成、送信する車間ネットワークにおいて、約16台(=100/(3×2))おきに同時にパケットを生成、送信する車両が位置することになり、近い車両同士が同時にパケットを生成、送信する問題が解決される。以上が送信タイミングの制御機能である。尚、パケットの転送は、パケットを受信したら直ちに行われる。図6に、係数 C を3とした場合の送信タイミング制御の例を示す。同図が示すように、車両③がパケット生成した時刻から $3 \times \Delta Tx$ 後にその直後の車両②が位置情報パケットを生成、送信する。一方、パケットの転送はパケットを受信したら直ちに行われる。

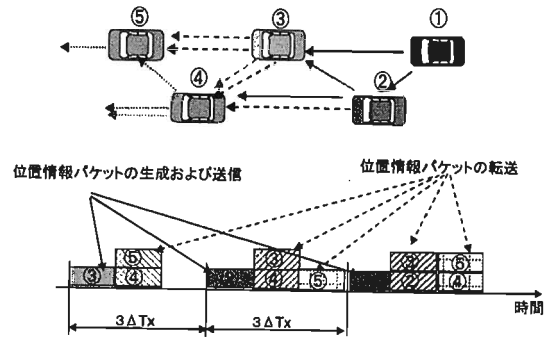


図6. 送信タイミング制御機能

4. シミュレーション評価

MM-SA パケット転送手法の特性を Qualnet ネットワークシミュレータ[15]を用いて評価した。シミュレーショントポロジを図7に示す。本トポロジーにおいて、お互いに交差する全長540メートル、片側1車線の2本の道路に車両長が5メートルの88台の車両を配置した。ここで、平均車頭間距離が19.4メートルである。パケット転送手法の転送エリアは送信車両の前方100m、後方0mとしており、送信車両と同一移動方向にある車両のみがパケットを送信するとした。

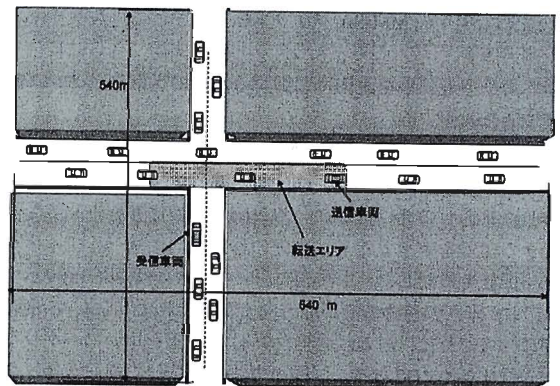


図7. シミュレーショントポロジー

シミュレーションにおいて提案方式の特性を CSMA/CA をベースとした転送方式の特性と比較した。CSMA/CA ベース方式は、基本仕様が RC005[13]に基づくものに3.1節で説明したチャネル割り当て手法と3.2節で説明したエリアベース転送手法を導入した方式である。MM-SA 転送方式と CSMA/CA 転送方式の特徴とその他のシミュレーションパラメータを表1に示す。

表 1. シミュレーションパラメータ

パラメータ	MM-SA 方式	CSMA/CA 方式
シミュレーション時間	30 [s]	
車両台数	88	
位置情報送信周期	100[ms]	
位置情報パケット長	1112 [bits]	
周波数帯	5.8 [GHz]	
周波数チャンネル数	4	
帯域幅	4.096 [MHz]	
変調方式	$\pi/4$ シフト QPSK	
受信感度	-94.5 [dBm]	-86 [dBm]
拡散率	7	-
エラー修正機能	-	Turbo (符号化率 1/3)
衝突ウィンドウサイズ	-	256
チャンネル割当機能	3.1 節の通り	
パケット転送機能	3.2 節の通り(前方 100m, 同一移動方向であればパケットを転送)	
送信タイミング制御機能	3.3 節の通り	-

出会い頭衝突防止アプリケーションを想定し(図 7), 優先道路を走行中の送信車両の位置情報パケットの非優先道路における受信車両における到達率を評価した。図 8 がパケット到達率の結果である。横軸は送信車両の位置(交差点からの距離)である。同図が示すように, CSMA/CA 方式における平均パケット到達率は約 80%であり, 現在 ITS 情報通信システム推進会議で検討が進まれている車車間通信の出会い頭衝突防止アプリケーションの要件である 80%を満たさない箇所が複数存在する。これに対して, MM-SA パケット転送方式の平均パケット到達率はほぼ 100% となっており, アプリケーションの要求条件を満足することが確認できる。

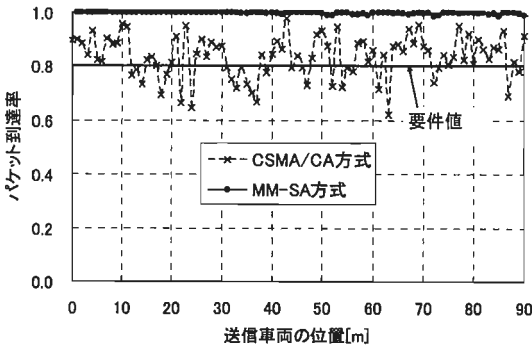


図 8. パケット到達率の比較

図 9 は各方式の場所率の比較を示す。任意の地点における場所率とは, 送信車両の位置が 0m から該地点までにおけるパケット到達率がアプリケーション要件を満たす割合(パケット到達率が 80%以上)を示すものである。即ち, どの地点においても場所率が 100%であることが要求される。図 9 が示す

ように, CSMA/CA 方式において送信車両の位置が 12m 以降において場所率が 100%を満たさない。一方, MM-SA 方式はどの地点においても場所率が 100%であり, アプリケーション要求を満たしている。

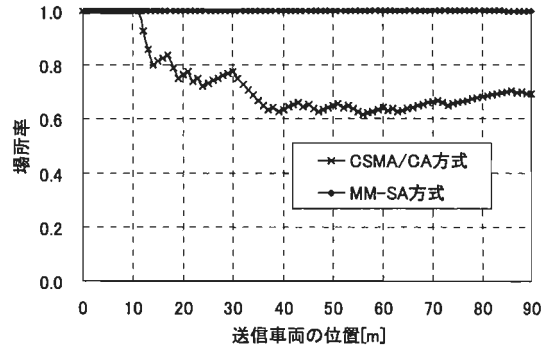


図 9. 場所率の比較

図 10 に送信車両の位置情報パケットが受信車両に到達するまでのホップ数を示す。なお, 送受信車両が直接通信できる場合ホップ数が 1 となる。結果図からわかるように, 受信感度の違いにより, 送信車両の位置が 10 メートル以降は CSMA/CA 方式が 2 ホップの通信を要し, 20 メートル以降は MM-SA 方式は 2 ホップの通信を要する。

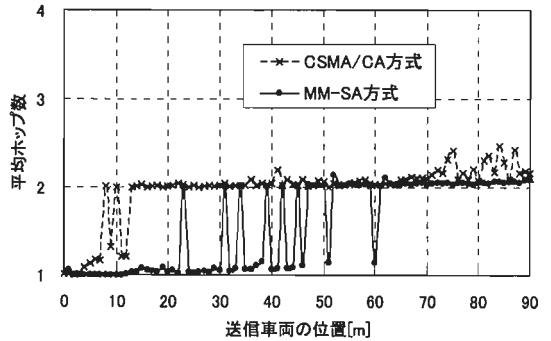


図 10. ホップ数の比較

次に, 送信車両の位置情報パケットが受信車両に到達するまでの遅延特性を図 11 に比較する。結果が示すように, CSMA/CA 方式の場合, 最大 25 ミリ秒のパケット到達遅延がかかっているに対して, MM-SA 方式の場合最大で 4 ミリ秒と遅延特性が非常に優れている。これは, CSMA/CA 方式において端末が順番にチャンネルをアクセスするに対して, MM-SA 方式において端末がチャンネルアクセスを必要とした時点で直ちにチャンネルアクセスができるからである。

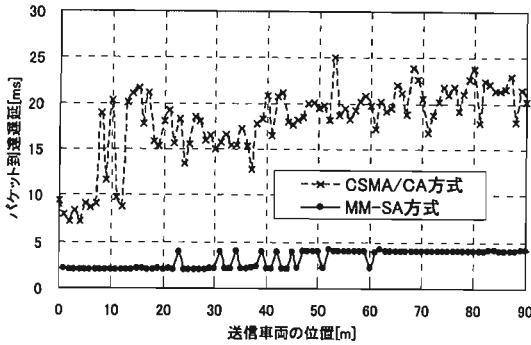


図 11. パケット到達遅延の比較

5. 結論

分散型無線通信における代表的なチャンネルアクセス手法は CSMA/CA である。CSMA/CA チャンネルアクセス手法は分散型ネットワークに容易に適用できるという利点をもつが、車両台数の増加に伴って通信の信頼性が著しく悪化するという問題を抱えている。一方、安全運転支援のためには、車両台数に依存しない高信頼、低遅延の車車間通信の実現が要求される。そこで、我々は CDMA をベースとした MM-SA 車車間通信技術およびそのシステムの開発が進めてきた。MM-SA 車車間通信システムにおけるチャンネルアクセス手法は、CSMA/CA に比べて、通信範囲が短い、車両台数に依存せず近隣車両間で信頼性の高い通信を確保できるという特性をもつ。しかし、車車間通信において重要なアプリケーションである出会い頭衝突防止、右折時衝突防止シナリオを想定した場合、車両の位置情報を比較的離れている車両にも伝える必要が生じる。そこで、我々は自己干渉、遠近効果を適切に制御しながらパケットのマルチホップ転送を実現する MM-SA パケット転送方式を提案し、本稿ではシミュレーション評価によりその効果を示した。シミュレーションにより、提案方式は、現在 ITS 情報通信システム推進会議で検討が進められている車車間通信の出会い頭衝突防止アプリケーションの要件を満足できることを示した。具体的には、CSMA/CA をベースとする転送方式におけるパケット到達率特性は、アプリケーション要求である 80% 以上を満たせない結果となっているに対して、MM-SA 転送方式は送信車両のどの位置においても約 100% のパケット到達率を得た。またパケット到達遅延特性に関しても、提案方式は、CSMA/CA をベースとする転送方式で得た平均 20 ミリ秒のパケット到達遅延より 15 ミリ秒以上短い遅延特性を得ることを確認した。

今後の予定として、右折時衝突防止シナリオにおける MM-SA 転送方式の性能を評価する。

本研究は情報通信研究機構の研究委託により実施したものである。

参考文献

- [1] T. Elbatt, S. K. Goel, G. Holland, H. Krishnan, and J. Parikh, "Cooperative Collision Warning Using Dedicated Short Range Wireless Communications," *ACM VANET'06*, pp. 1-9, 2006.
- [2] S. Motegi and H. Horiuchi, "Relay Control for Data Dissemination of Spontaneous Vehicle Networks," In proceedings of the 6th International Conference on ITS Telecommunications, pp. 1098-1101, 2006.
- [3] 関馨, 浜口雅春, 前田忠彦 安全運転のための車車間通信中継方式の検討, 情報処理学会研究報告, ITS2008, pp. 23-30, 2008.
- [4] 関馨, 浜口雅春, 茂木信二 車車間通信におけるパケット中継制御方式の検証実験, 情報処理学会研究報告, ITS2008, pp. 19-26, 2008.
- [5] ANSI/IEEE Std 802.11, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," 1999.
- [6] 酒井敏弘, 門脇直人, 板谷聡子, マハダッドヌリシラジ, 小花貞夫, "アドホック無線通信システムの高レスポンス化に関する提案," 電子情報通信学会研究報告 RCS2006, pp. 139-144, 2006.
- [7] Oyunchimeg Shagdar, Mehdad. N. Shirazi, Ryutaro Suzuki, Sadao Obana, "Medium Access Control for Distributed CDMA Networks," *IEICE Technical Report*, Vol. 106, No. 577, pp. 247-253, 2007.
- [8] 酒井敏弘, 大山卓, 鈴木龍太郎, 門脇直人, 小花貞夫, "高レスポンスアドホック無線通信方式: MM-SA 方式の思索と性能評価," 電子情報通信学会研究報告 RCS2007, pp. 13-18, 2007.
- [9] Mehdad N. Shirazi, Oyunchimeg Shagdar, Suhua Tang, Ryutaro Suzuki, and Sadao Obana, "On Latency and Reliability of CDMA based Inter-vehicle Communication," *IEICE Technical Report*, AN2007-67, pp. 19-24. March 2008.
- [10] O. Shagdar, S. Tang, M. N. Shirazi, R. Suzuki, and S. Obana, "Reliable Cut-Through Forwarding in CDMA Inter-Vehicle Networks," *Proceedings of ICUMC 2008, ACM*, pp. 508-513, Feb. 2008.
- [11] M. N. Shirazi, O. Shagdar, T. Ohyama, S. Tang, R. Suzuki, and S. Obana, "Transmission Scheduling in CDMA-based Inter-Vehicle Communication," *IEICE Technical Report*, ITS2008-9, pp. 7-12, 2008.
- [12] ITS 情報通信システム推進会議, 車車間通信システム専門委員会活動報告 (平成 19 年度)
- [13] ITS 情報通信システム推進会議, "5.8GHz を用いた車車間通信システムの実用ガイドライン (1.0 版) ,(2007.5).
- [14] 国土交通省自動車交通局, 先進安全自動車推進検討会, 先進安全自動車 (ASV) 推進計画 報告書, 第 3 期 ASV 計画における活動成果について, 平成 18 年 3 月.
- [15] Qualnet Simulator, "<http://www.scalable-networks.com/>"