

テクニカルノート

車車間通信を用いた予防安全アプリケーションのための自律分散型 TDMA プロトコル向け送信周期制御方式の提案

田所 幸浩^{†1} 牧戸 知史^{†1}
伊藤 健二^{†1} 鈴木 徳祥^{†1}

車車間通信を用いた予防安全アプリケーション実現に向けて、高信頼通信を図る D-TDMA 方式が提案されている。しかし本方式では、渋滞時のような車両が密集する場合、通信容量を超える通信トラヒックが発生して車車間通信が成立しない。現在、このような状況でも車車間通信の実現を図る送信周期制御手法が提案されているが、パケット伝送に 1 度失敗すると次の送信まで時間が空いてしまい、予防安全アプリケーション不成立につながる。そこで本報告では、渋滞時でも予防安全アプリケーションが成立するように、D-TDMA 方式に適した新たな送信周期制御手法を提案する。ここでは、D-TDMA 方式の特徴を活かし、伝送に失敗した場合には次のパケット送信をただちに行う。このような提案手法は、予防安全アプリケーションの成立性と通信品質の 2 つの観点から有効であることを示す。

A Proposal of Transmission Period Control Scheme for Decentralized TDMA Protocol in Safety Applications Using Inter-vehicle Communications

YUKIHIRO TADOKORO,^{†1} SATOSHI MAKIDO,^{†1}
KENJI ITO^{†1} and NORIYOSHI SUZUKI^{†1}

To realize safety applications based on Inter-Vehicle Communication (IVC), Decentralized TDMA (D-TDMA) protocol has been proposed for high-reliable IVC. When the volume of traffic on a roadway is so high such as traffic jam, D-TDMA protocol does not work properly. The primary reason is huge amount of the communication traffic, which might be resolved by conventional Transmission Period Control (TPC) schemes. However, in the TPC schemes, the

failure of packet transmission causes the extension of communication interval between vehicles, which would result in not working the safety applications. This paper proposes a novel TPC scheme suitable for D-TDMA protocol to realize the safety applications. In the proposed scheme, taking advantage of the frame-information exchange in D-TDMA protocol, the next packet is quickly transmitted at the failure of packet transmission. Such a proposed scheme is shown to be valid from the viewpoints of both communication quality and the safety applications.

1. はじめに

現在、自動車事故による死傷者を減らすことを目的として、車車間通信を用いた予防安全アプリケーションが検討されている^{1)–3)}。車車間通信で使用可能な周波数帯域が 720 MHz 帯に割り当てられることが決まり、このような予防安全アプリケーションへの期待が高まっている。予防安全アプリケーション実現のため、国土交通省の先進安全自動車 (Advanced Safety Vehicle: ASV) プロジェクト²⁾では、周辺車両に対して所定の周期で、車両位置や速度などの情報を、1 ホップで同報的に送ることを検討している。そして、自車が規定の距離 D [m] だけ移動するごとに、周辺車両に対して自車位置や速度などを正しく伝えることで予防安全アプリケーションの成立を図る。

予防安全アプリケーション成立のために、我々は自律分散制御に基づく時分割型の高信頼 MAC プロトコル (Decentralized TDMA: D-TDMA) を提案してきた⁴⁾。しかしながら交通渋滞が発生すると、パケットを送信する車両が特定エリアに密集することになり、通信容量を超えるほどの通信トラヒックが発生して通信品質の劣化が発生する。

この課題に対して、パケットの送信周期を送信車両の速度に応じて制御する送信周期制御手法 (Transmission Period Control: TPC) が、CSMA/CA プロトコルに対して提案されている²⁾。これにより通信トラヒックは抑えられるが、送信周期が長いときにパケット衝突などでパケット伝送に失敗した場合、次の送信までに大きく時間が空いてしまうことで周辺車両への情報提供が遅れ、予防安全アプリケーションが成立しない。また車速のみから送信周期を決めてしまうと、通信トラヒックが集中していないにもかかわらず送信周期を延ばしてしまうという問題もある。

^{†1} 株式会社豊田中央研究所
Toyota Central R&D Laboratories, Inc.

そこで本報告では、渋滞時でも予防安全アプリケーションの成立を図るため、D-TDMA 方式に適した送信周期制御手法を提案する。ここでは、送信したパケットが周辺車両で正しく受信できたかを送信車両にフィードバックするという D-TDMA 方式独自の機能を利用する。そして送信車両がパケット伝送失敗を検知した場合、設定された送信周期にかかわらず短い時間間隔で次の送信を行い、周辺車両への情報提供が遅れることを防ぐ。さらに送信周期の延長が最小限となるように、送信周期を車速から求めるのではなく、発生した通信トラヒック量に基づき決定する。このような提案手法を予防安全アプリケーション成立性と通信品質の観点から評価し、提案手法の有効性を示す。

2. 従来の通信トラヒック制御手法²⁾

ASV から提案されている通信トラヒック制御手法 TPC を簡単に説明する。TPC では、送信車両の速度 v [m/s] に応じて送信周期 T_S [s] を決定する：

$$v \cdot T_S \leq D \quad (1)$$

このように車速に応じて一律に送信周期を決めてしまうと、送信周期が長いときにパケット伝送に失敗した場合、次のパケット送信までに大きく時間が空いてしまう。その結果、自車が規定の距離 D を移動する間に、周辺車両に対して位置情報などを提供できない。また車速のみから送信周期を決めてしまうと、通信トラヒックが集中していないにもかかわらず送信周期を伸ばしてしまうことにもなる。

3. 予防安全アプリケーションに適した送信周期制御手法

3.1 D-TDMA 方式⁴⁾ の概要

D-TDMA 方式は、周辺車両に対して予約したスロットを、一定周期 T_S で繰り返し使用してパケットを送信する、時分割アクセス型の MAC プロトコルである⁴⁾。スロットは図 1 のように周期 T_F のフレームを N 個に分割したもので構成される。各スロットは、フレーム周期 T_F で繰り返される。

各車両が受信したパケットには、送信車両側で過去 1 フレームに受信したパケットの、その受信成否を示す情報（フレーム情報）が含まれる。受信車両はこのフレーム情報を参照することで、自身が過去に送信したパケットが伝送に成功したかどうかを検知できる。成功の場合はスロットが予約できたと判断し、以降は同一スロットでパケットを送信する。逆に伝送失敗の場合、他のスロットを使用してパケットを送信する。

送信周期制御手法を用いた場合、送信周期 T_S はスロットの繰返し周期 T_F よりも大きく、

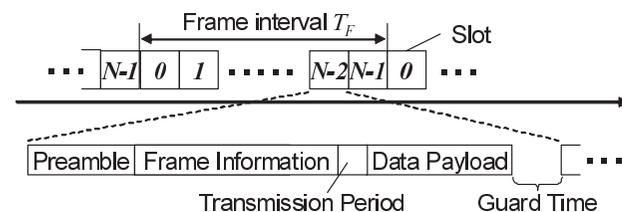


図 1 D-TDMA 方式のパケットフォーマット

Fig. 1 The packet format in D-TDMA protocol.

同一スロットを繰り返し使用することから T_F の倍数となる。このとき、数フレームに 1 度だけパケットを送信することになるため、送信しないフレームにおいてはスロット予約を解除し、他の車両がスロットを使用することを許可する。また送信周期制御手法を用いると、送信周期の異なる車両が混在することになり、D-TDMA 方式の特徴である予約型アクセスが正しく動作しない可能性がある。たとえば送信周期の長い車両が、あるスロットを予約している場合、パケット送信を行わないフレームが存在する。このようなフレームにおいて、たとえば最小間隔で送信するような送信周期の短い車両が現れると当該スロットをすべてのフレームで使用することになり、送信周期の長い車両が予約していたスロットを奪ってしまう。このような状況は、スロットがフレームごとに異なる送信周期で予約された場合に発生するといえる。そこで、たとえばパケットヘッダに含まれる送信周期情報から、各スロットがどのような周期で予約されているのかを判断し、スロットがすべてのフレームにおいて同じ送信周期で予約されるような処理を行うことで、このような問題が回避できる。

3.2 提案の通信トラヒック制御手法

パケット伝送に失敗した場合に周辺車両への情報提供が遅れることを防ぐため、提案の送信周期制御機能（Advanced TPC: ATPC）を持つ D-TDMA 方式では、1 度伝送に失敗してから次のパケットを送信するまでの時間を送信周期にかかわらず短く設定する。1 回の伝送失敗のみを考慮するのは、D-TDMA 方式では、パケット衝突による伝送失敗を送信車両に通知することで、継続的な伝送失敗の発生を回避する機能があるためである⁴⁾。具体的には、図 2 のように、送信車両が伝送失敗を検知した時刻から時間 T_E 内で、周辺車両が使用していないスロットをランダムに選び、次のパケットを送信する。そして時間 T_E を送信周期 T_S より小さく設定することで、伝送失敗から短い時間で次のパケット送信を可能とする。さらに、発生通信トラヒック量に応じて送信周期を決定することで、通信トラヒックが集中した場合のみ送信周期を延長することが可能である。

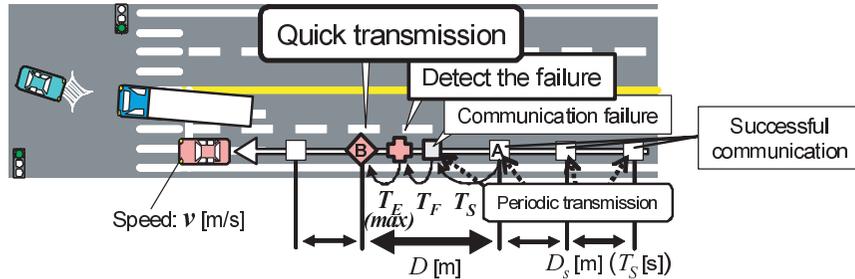


図2 D-TDMA/ATPCでのパケット送信動作例
Fig.2 Packet transmission in D-TDMA/ATPC.

D-TDMA/ATPCでの送信周期の決定方法を示す。伝送失敗から次のパケットを送信するまでには、パケット送信後からその通信失敗検知に1フレーム時間 T_F がかかること⁴⁾、次パケット送信に最大 T_E かかるため、時間 $(T_F + T_E)$ が必要となる。この時間に1送信周期分の時間を加えた時間 $(T_S + T_F + T_E)$ が、周期的なパケット送信に成功してから1度伝送に失敗した後、次のパケットを送信するまでにかかる時間となる(図2の地点AB間を移動する時間に相当)。この時間内に移動する距離が規定距離 D を超えず、1度伝送に失敗しても次の伝送に成功すれば、規定距離の移動内で周辺車両への情報提供が可能となる。そこで、

$$(T_S + T_F + T_E) \cdot v \leq D$$

$$T_S \leq D/v - (T_E + T_F) = \check{T}_S \quad (2)$$

が満たされる、時間 \check{T}_S 以下となるように送信周期 T_S を設定すればよい。

次に、発生通信トラヒック量に応じた送信周期の決定方法を示す。ここでは、許容される通信トラヒック量の上限 ξ_H と下限 ξ_L を設定し、通信トラヒックが ξ_H と ξ_L の間に収まるように送信周期を決定する。具体的には、通信トラヒック量が ξ_H を超えた場合、通信トラヒックに余裕がなく通信容量に近づいていると判断して送信周期を延長する。また通信トラヒックが下限値 ξ_L を下回った場合、通信トラヒックに余裕があると判断し、送信周期を短縮する。

通信トラヒックを測る尺度として、スロット使用率 R_S を使用する。スロット使用率とは、1フレームにある N 個のスロットのうち、周辺車両でどの程度パケットが送信されたかを表す：

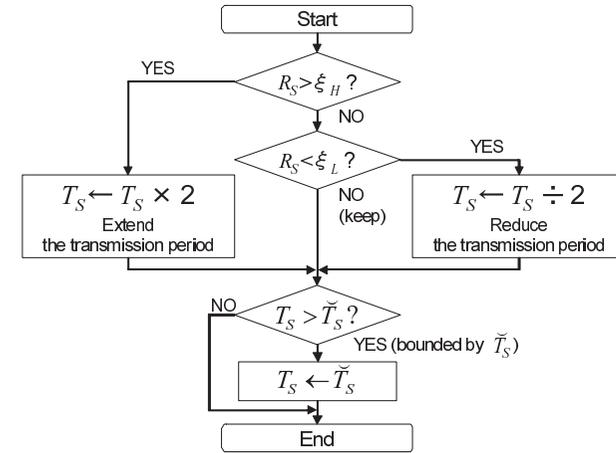


図3 D-TDMA/ATPCにおける送信周期の決定処理
Fig.3 Determinating the transmission period in D-TDMA/ATPC.

$$R_S = \frac{N - N_{free}}{N} \quad (3)$$

ここで、 N_{free} は1フレームの中でパケットが送信されていないと判断されたスロット(空きスロット)の数を表す⁴⁾。

以上より、提案のD-TDMA/ATPCでは、式(2)の \check{T}_S を超えないように、発生した通信トラヒックに応じて送信周期 T_S を決定する。この操作をまとめると図3となる。ここでは例として、送信周期を延長する場合には2倍に、短縮する場合には1/2に変更するものとした。

4. 計算機シミュレーションによる性能評価

提案の送信周期制御手法を、通信品質と予防安全アプリケーションの成立性という2つの観点から性能評価を行い、提案手法の有効性を示す。

4.1 シミュレーションモデルと諸元

提案手法について、文献5)と同様な手法を用いることで、現実に近い交通状況などを考慮した評価を行う。そこでns-2⁶⁾による通信シミュレーションの際、使用する車両の位置や速度のデータとして、交通流シミュレータ(NETSTREAM)⁷⁾を用いて作成されたもの

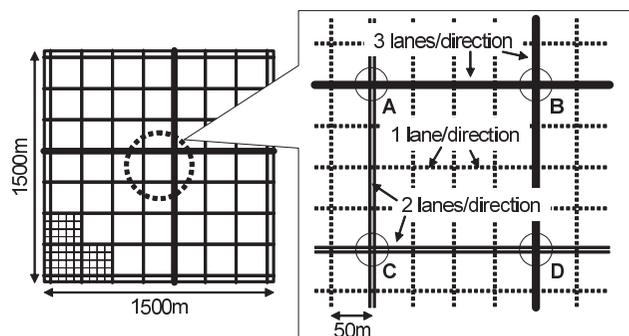


図 4 計算機シミュレーションで使った市街地の道路モデル^{2),5)}
 Fig. 4 The road model used in the simulation^{2),5)}.

表 1 シミュレーション諸元
 Table 1 Simulation specifications.

Data size	100 bytes
Packet length	208 μ s
Slot length	240 μ s
Number of Slot (N)	416
Frame interval (T_F)	100 ms
Minimum traffic (ξ_L)	0.10
Maximum traffic (ξ_H)	0.30
T_E	$4T_F$ ms
Radio frequency	720 MHz
Communication area	210 m
Antenna height	1.5 m

を使用する。想定する道路モデルは、図 4 に示されるような、ASV で検討されている格子状の市街地モデル²⁾である。

シミュレーション諸元を表 1 に示す。車両として乗用車を想定し、送受信のアンテナ高はすべて 1.5 [m] とした。また、車両密度が約 60 [台/km/lane] という渋滞の状況を想定し、車両は平均速度約 18 [km/h] で移動する。また物理レイヤ方式として IEEE802.11 p を想定してパケット長などを設定した。また本報告では、MAC プロトコルでの通信トラフィック制御手法の提案という観点から、物理レイヤにおける復調誤りはなく、完全にスロット同期がとれているものとした。スロット同期については GPS による実現が考えられ、復調誤りに

表 2 送信周期の数値例

Table 2 Transmission period setting.

v [km/h]	ATPC [ms]	TPC ²⁾ [ms]
60.0 ~	{100}	100
45.0 ~ 60.0		200
30.0 ~ 45.0	{100, 200}	400
18.0 ~ 30.0	{100, 200, 400}	
15.0 ~ 18.0	{100, 200, 400, 800}	400
0.0 ~ 15.0		800

よる性能低下を考えると本報告で示す数値は性能の上限値ととらえることができる。表 2 に、計算機シミュレーションで用いた、車速 v に対する送信周期の値を示す。これは、式 (1) および (2) において、GPS により取得する位置の精度や、車両の長さがおおよそ 5 [m] 程度であることを考慮し、 $D = 5$ [m] として求めたものである。D-TDMA/ATPC については、通信トラフィック量に応じて送信周期が決定されるため、車速 v に対しては複数の送信周期の値をとりうる。

4.2 数値例

計算機シミュレーションにより得た数値を示し、提案手法を考察する。ここでは、図 4 に示す A/B/C/D の 4 つの交差点中心に 1 台ずつ車両を配置し、これらの車両とその周辺を走行する車両との通信について評価する。ここで、周辺を走行する車両とは、交差点中心にある各車両と通信が可能な車両であり、表 1 より交差点中心から最大 210 [m] の範囲に走行する車両と定義される。評価指標として、通信トラフィック量、および交差点中心の車両と周辺車両とのパケット伝送成功の程度を表すパケット成功確率を用いる。さらに、周辺車両のうちどの程度の割合の車両が規定距離 D [m] を移動する間に、交差点中心の車両に対して位置情報などを提供できるかを示す指標（以下、情報更新距離 D [m] を満たす車両台数割合と呼ぶ）の 3 つを用いる。具体的には、図 4 の 4 つの交差点中心に配置された車両と通信が可能な範囲において、周辺の送信車両が走行しながら行うパケット伝送がつねに情報更新距離 D [m] を満たすように行われている場合、その送信車両を情報更新距離 D [m] を満たした車両として数える。そのため、1 度でもパケット伝送誤りが連続して発生すると情報更新距離 5 m を満たさない車両と判断される。なお、これらの値は、20 秒間の車両移動および通信のシミュレーションを実施し、A ~ D の 4 車両における平均値を求めた。また比較のため、送信周期制御を用いない D-TDMA 方式 (w/o TPC) と、従来の送信周期制御手法を用いた場合 (w/ TPC) の特性も示す。

表 3 発生した平均通信トラフィック量 [packets/ T_F]
Table 3 Averaged communication traffic [packets/ T_F].

w/ATPC	w/TPC	w/o TPC
85.6	81.5	673.9

表 4 平均パケット成功確率 [%]
Table 4 Averaged packet success rate [%].

w/ATPC	w/TPC	w/o TPC
96.5	98.7	34.3

表 5 情報更新距離 5 [m] を満たす車両の台数割合 [%]
Table 5 The ratio of the number of the vehicles which meets $D = 5$ [m].

w/ATPC	w/TPC	w/o TPC
81.2	72.3	30.9

まず、送信周期制御による通信トラフィックの削減効果を表 3 に示す。ここでは通信トラフィックとして、1 フレーム時間 T_F 内で A ~ D の 4 台の各車両で受信したパケット数の平均値を用いた。1 フレームあたりのスロット数 N が 416 であることからこの数値が D-TDMA 方式の通信容量といえるが、表 3 より送信周期制御を用いないと通信容量以上の通信トラフィックが発生していることが分かる。しかし送信周期制御手法を用いると、通信トラフィックは減り、通信容量以下に収まる。その結果、表 4 に示される平均パケット成功確率についても送信周期制御手法を用いると良好な性能が得られる。特に TPC と ATPC を比較すると、ATPC の方が発生通信トラフィック量に応じて送信周期を制御するため、発生する通信トラフィック量も大きくなる。その結果パケット衝突の可能性も増え、ATPC のパケット成功確率は TPC よりも悪くなる。

情報更新距離 D [m] を満たす車両の台数割合を表 5 に示す。ここでは、例として $D = 5$ [m] と設定した。まず ATPC と TPC を比較すると、ATPC の方が 1 割程度良い。これは、パケット伝送に失敗した場合、設定された送信周期にかかわらずなるべく短い間隔で次の送信を行い周辺車両への情報提供が遅れることを防ぐ、ATPC の動作によるものである。次に送信周期制御手法の有無で比較すると、送信周期制御手法を用いた場合、通信トラフィックの削減効果により顕著な特性改善が見られる。ただ表 4 によると、TPC を用いた場合ではパケット伝送誤りが 1.3% と小さい確率で起こるにもかかわらず、表 5 のように情報更新距離が 5 m を満たさない確率が 27.7% と大きい。ATPC についても同様である。これは、1 回でもパケット伝送誤りが連続して発生すると情報更新距離を満たさない車両として数えられ

るためであると考えられる。

5. むすび

本報告では渋滞時でも、予防安全アプリケーションの成立を目指して、D-TDMA 方式に適した新しい送信周期制御手法を提案した。提案手法では、パケット伝送に失敗した場合、設定された送信周期にかかわらず短い間隔で次のパケット送信を行うことで、予防安全アプリケーションの成立を図る。このような提案手法は、予防安全アプリケーションの成立性と通信品質の 2 つの観点から評価を行った結果、優れた性能を持つことが示された。

D-TDMA 方式ではパケット伝送誤りを送信車両に通知することでパケット衝突による継続的なパケット伝送誤りを回避する機能がある。そこで本報告では、1 回のパケット伝送誤りのみを考慮した。ただ現実的には捕捉効果などの影響により継続して伝送に失敗する状況も起こりうるため、2 回以上のパケット伝送誤りが発生する場合の性能評価や対策を検討する必要がある。

謝辞 本研究は、総務省の委託研究「車車間通信の実現に向けた周波数高度利用技術の研究開発」プロジェクトの成果である。

参 考 文 献

- 1) Chen, W. and Cai, S.: Ad hoc peer-to-peer network architecture for vehicle safety communications, *IEEE Commun. Mag.*, Vol.43, No.4, pp.100-107 (2005).
- 2) 国土交通省：先進安全自動車 (ASV). <http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/> (参照 2009-04-17)
- 3) 金光寛幸：ASV 情報交換型運転支援システムシステムコンセプトと技術的検討，電子情報通信学会技術研究報告，pp.29-34 (2005).
- 4) 牧戸知史ほか：リアルタイム車車間通信のための自律分散型 TDMA プロトコル，情報処理学会論文誌，Vol.48, No.7, pp.2257-2266 (2007).
- 5) 伊藤健二ほか：車車間通信による安全運転支援システムの性能評価，情報処理学会研究報告，pp.13-20 (2007).
- 6) The Network Simulator NS-2 (オンライン). <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (参照 2009-04-19)
- 7) 森 博子ほか：愛・地球博開催時の交通状況予測シミュレーション，豊田中央研究所 R&D レビュー，Vol.41, No.4, pp.45-51 (2006).

(平成 21 年 5 月 6 日受付)

(平成 21 年 9 月 11 日採録)



田所 幸浩

昭和 53 年生．平成 12 年名古屋大学工学部電子情報工学科卒業．平成 17 年同大学大学院博士後期課程修了．平成 18 年（株）豊田中央研究所入社．スペクトル拡散通信システム，マルチユーザ受信技術，車車間通信システムの研究に従事．博士（工学）．電子情報通信学会，IEEE 各会員．



牧戸 知史（正会員）

昭和 49 年生．平成 13 年（株）豊田中央研究所入社．平成 15 年名古屋大学大学院博士後期課程修了．自動車用レーダの研究に従事後，現在，車車間通信の研究に従事．博士（工学）．平成 19 年情報処理学会 DICO ンポジウム最優秀論文賞受賞．電子情報通信学会会員．



伊藤 健二（正会員）

昭和 52 年生．平成 11 年名古屋工業大学工学部電気情報工学科卒業．平成 13 年同大学大学院博士前期課程修了．同年（株）豊田中央研究所入社．地上デジタル放送移動受信システム，車車間通信システムの研究に従事．平成 12 年度電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会奨励賞，平成 20 年 IEEE Consumer Electronics Society 2006 Chester Sall

Award for the First Place Transactions Paper Award，平成 20 年および平成 21 年情報処理学会高度交通システム研究会優秀論文賞，平成 21 年情報処理学会山下記念研究賞受賞．電子情報通信学会，IEEE 各会員．



鈴木 徳祥

昭和 41 年生．平成 2 年京都大学工学部電子工学科卒業．平成 4 年同大学大学院修士課程修了．同年（株）豊田中央研究所入社．マルチキャリア変調技術，デジタル移動通信システム，ソフトウェア無線，車車間通信システムの研究に従事．博士（工学）．平成 10 年度電子情報通信学会学術奨励賞，平成 20 年 IEEE Consumer Electronics Society 2006 Chester

Sall Award for the First Place Transactions Paper Award 受賞．電子情報通信学会，情報理論とその応用学会，IEEE 各会員．