

車車間通信における非持続型 CSMA プロトコルの提案

田代 裕和[†] 土橋健太郎[†] 高橋 健志[†] 浅谷 耕一^{††} 富永 英義[†]

[†] 早稲田大学大学院 国際情報通信研究科

^{††} 工学院大学 電子工学科

E-mail: †{h.tashiro, doba, take, tominaga}@tom.comm.waseda.ac.jp, ††asatanik@cc.kogakuin.ac.jp

あらまし 車車間通信では、動的に変化する車両間位置関係に適応するため、リアルタイム性と車両間ネットワークにおける車両の参加・離脱に対する柔軟性が求められる。本稿では、通信遅延を削減し、信頼性の高いネットワークを構成する車車間通信プロトコルを提案する。本提案手法では、各車両のネットワークへの参加・離脱に柔軟に対応可能なコンテンション型のプロトコル「Non-persistent 型（非持続型）CSMA」を改良し、周囲の車両密度に応じてキャリアセンスするまでの待ち時間を制御することで、安全運転支援に必要な数十ミリ秒間隔の通信に成功する車両の数を増加させることを目的とする。そして、シミュレーションを用いて、各端末が通信に成功するまでの平均遅延と、要求時間内に最低 1 度は通信に成功する車両の割合という 2 つの観点から、本提案手法を評価し、その有効性、実用性を明らかにする。

キーワード 車車間通信, MAC プロトコル, CSMA

A Framework of Non-persistent CSMA Protocol for Inter-Vehicle Communications

Hirokazu TASHIRO[†], Kentaro DOBASHI[†], Takeshi TAKAHASHI[†], Koichi ASATANI^{††}, and
Hideyoshi TOMINAGA[†]

[†] Graduate School of Global Information and Telecommunication Studies, Waseda University, Japan

^{††} Department of Electronic Engineering, Kogakuin University, Japan

E-mail: †{h.tashiro, doba, take, tominaga}@tom.comm.waseda.ac.jp, ††asatanik@cc.kogakuin.ac.jp

Abstract Inter-vehicle communication is required to be real-time and to be adaptive to the dynamic network topology changes caused by the movement of vehicles. In this paper, we propose a protocol for inter-vehicle communications that reduces the delay and forms reliable vehicle networks. The proposed scheme extends contention type protocol which forms network dynamically adaptive to vehicle network topology changes. It reduces the delay and increases the number of vehicles that can transmit a frame within maximum transmission interval by controlling carrier sensing interval according to the vehicle density. Finally, simulation evaluates the proposed scheme from the viewpoint of average delay and transmission success rate and clarifies the effectiveness of the proposed scheme.

Key words Inter-vehicle Communication, MAC Protocol, CSMA

1. はじめに

近年、無線通信技術や小型カメラなどのセンサー技術の発展に伴い、自動料金収受システム (Electronic Toll Collection : ETC) などの高度道路交通システム (Intelligent Transportation System : ITS) 技術に関する研究が全世界で推進されている。そのアプローチの 1 つとして、マルチホップ情報配信や

特定車群内でのデータ共有、安全運転支援、協調走行などを目的とした「車車間通信」というものが挙げられる [1]~[7]。代表的な走行支援・協調走行システムとしては、2 車線にまたがる 5 台の車両が障害物を回避するために、各車が連携しながら車線変更を行うシーンなどを公開したデモンストレーション DEMO2000 がある [1]。

車車間通信では、各車両はその瞬間に通信範囲に存在する車

両と通信を行い、自立的にネットワークを形成する。さらに、通信対象となる車両は常に移動し、数秒の遅延が人間の生命に直接的に影響を及ぼすことを考慮すると、安全面から数十ミリ秒間隔という非常に短い時間（以下、要求時間）で信頼性の高い通信を行い、ネットワークポロジの急激な変化に柔軟に対応しなければならない。すなわち、車車間通信では、データ伝達のリアルタイム性と車車間ネットワークへの参加・離脱に対応可能な柔軟性の両方が重要となる。

本稿では、第2章で車車間通信における通信プロトコルの課題と従来手法について説明し、第3章にて提案手法について説明を行い、第4章でシミュレーションによる評価・考察を行う。最後に、第5章でまとめを行う。

2. 車車間通信プロトコル

従来研究されてきた車車間通信プロトコルとしては、リアルタイム性に優れた予約型プロトコル [2], [3] と、ネットワーク変化に対する柔軟性に優れたコンテンション型プロトコル [1], [4], [5] がある。

予約型プロトコルでは、事前に時間やコードを割り当てておくので、高度車両制御システム (Advanced Vehicle Control System : AVCS) に必要とされる数十ミリ秒間隔のリアルタイム通信に適している。しかし、通信対象車両となる可能性のある全ての車両に対して事前に時間、周波数、もしくはコードを割り当ておく必要があるため、隣接車両や対向車線の車両などネットワーク参加車両の急激な参加・離脱には対応が困難である。

一方、CSMA [1], [4] や R-ALOHA [5] などコンテンション型プロトコルは、ネットワークポロジの変化、車両の参加・離脱に対して柔軟に対応できる。特に CSMA では、各車が自立的にチャンネルをキャリアセンスするので、データ衝突を大きく削減し、信頼性は高く、急激なネットワーク変化に柔軟に対応できる。実際、先に挙げた協調走行デモンストレーション DEMO2000 [1] で使用された DOLPHIN プロトコル [4] でも、CSMA プロトコルが採用されている。

この CSMA には、CSMA/CA、Non-persistent 型 (非持続型) CSMA、 p -persistent 型 (p -即時型) CSMA の3つの代表的な方式がある。CSMA/CA では、各ノードがキャリアセンス後、送信するまでに、DIFS やランダムなバックオフ時間待たなければならない。平均遅延という観点から、CSMA/CA を車車間通信プロトコルとして採用する際の適応性を調べるために、表1に示す環境で行った予備実験を行った。本予備実験の結果を図1に示す。図1より、IEEE802.11b (CSMA/CA) のアドホックモードを用いた際、AVCS に必要とされる数十ミリ秒間隔での送信を行うと、たとえ周囲に4台のみしか存在しない状況でも100ミリ秒から1秒程度の平均遅延が生じてしまうことが分かる。さらに通信対象範囲に13台の車両が存在する場合は、数十ミリ秒間隔での送信を試みると、遅延が10秒近くかかることが確認できる。すなわち、CSMA/CA を用いた場合、通信データサイズが小さく、要求時間が数十ミリ秒の車車間通信に対応するためにデータ送信間隔を短くする

表1 CSMA/CA による実験パラメータ

Protocol	IEEE802.11b(CSMA/CA)
Types of Network	Ad-hoc Network
Transmission Interval	10~1000 [msec]
Transmission Rate	4 [Mbps](Max Effective Bit Rate)
Packet Size	64 [byte]
The Number of nodes	4 - 13

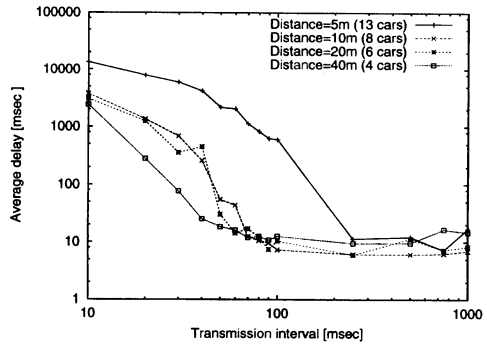


図1 CSMA/CA における遅延

と、端末数が多いほどチャンネルがビジーである可能性が上昇し、DIFS やバックオフ時間が増加し、遅延が増大するという問題点がある。実際の交通流では、渋滞時や交差点など車両数がさらに多い状況も考えられるので、安全運転支援や自律走行をも目的としている車車間通信では、この遅延は重要な課題となる。

チャンネルが使用中にランダムな時間待って再キャリアセンスを行う非持続型 CSMA と、チャンネルがアイドル状態にある場合に確率 p で送信を行う p -即時型 CSMA とについては、車車間通信が想定される環境では、非持続型 CSMA の方が、 p -即時型 CSMA より適しているという報告がある [4]。非持続型 CSMA では、各車はデータを送信する前にキャリアセンスする。もしチャンネルがアイドル状態であれば、直ちに送信する。一方、すでに他の端末がチャンネルを使用し、チャンネルがビジー状態である場合は、各車はキャリアセンスを停止し、ランダム時間待機した後、再度このアルゴリズムを繰り返す。したがって、通信対象範囲の車両の台数（以下、車両密度）が少ない場合はチャンネルがビジー状態である可能性が小さいので、この待ち時間を短く設定することで、各車は非常に短時間間隔で通信を行える。しかし車両密度が高い場合は、チャンネルが使用されている可能性が高くビジー検知が多発し、待ち時間による遅延が増大するため、要求時間内に通信を行える車両数の割合が低下してしまう。

そこで、我々は、非持続型 CSMA を改良し、周囲の車両密度に応じてキャリアセンスするまでの待ち時間を制御する方式を提案する。本提案方式により、車両密度が高い場合でも、遅延を削減し、要求時間内にデータを送信できる車両数を増やすことを目的とする。

3. 提案手法

本章では、車両間ネットワークの変化に柔軟に対応することが可能なコンテンション型のプロトコルを採用した上で、遅延を削減し、信頼性の高い車両間ネットワークを形成する車両間通信プロトコルを提案する。本提案手法では、周囲に存在する車両の密度に応じて、チャンネルがビジー状態の際に、次のキャリアセンスを行うまでの待ち時間を制御する。具体的には、キャリアセンスにより推定可能な周囲の車両密度に応じて、待ち時間をランダムに設定する際に用いられる乱数の上限値を次の式 (1) により制御する。

$$t < T_n < K - \sum_{i=1}^{n-1} T_i - t \quad (1)$$

t は 1 データの送信時間、 K は要求時間、 T_n は次のキャリアセンスまでの待ち時間、 n は再キャリアセンス回数であり、送信に成功すると 0 に戻る値である。図 2 に本提案手法のフロー図を示す。本提案では、非持続型 CSMA を採用しているため、キャリアセンスを行った際、チャンネルがアイドル状況の場合は、直ちに送信する。一方、チャンネルがビジー状態の場合は、次にキャリアセンスするまでの待ち時間をランダムに設定する際の乱数の上限値を式 (1) により制御する。以上より、遅延を削減、時間効率を改善し、要求時間内に最低 1 度は送信に成功する車両数の増加を実現する。ビジー検知が多発し、式 (1) を満たさなくなった場合は、その周期内には送信に失敗したと判断し、その期間で累計した合計待ち時間 $\sum_{i=1}^{n-1} T_i$ を 0 にリセットする。また本提案手法では、キャリアセンスによる衝突削減に加え、各車が自律的にキャリアセンスするため、周辺車両との同期がとれている必要がないというコンテンション型プロトコルの利点も当然のことながら有する。

式 (1) によりキャリアセンスまでの待ち時間を制御しても、なお要求時間内に送信できる確率が安全運転支援に要求される値より低い場合は、本研究では通信範囲を 100m 程度と想定しているため、周囲に高密度で車両が存在する場合は、車両間の位置変化は遅く、高速で車が走行している場合に比べ要求時間は長く、各車は送信頻度を抑えることが可能と考えるため、要求時間 K を適応的に拡大する。

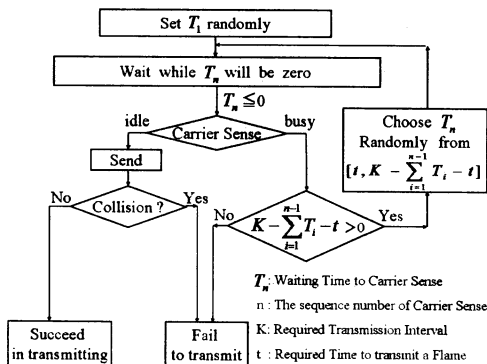


図 2 The flow of proposed scheme

4. 評価

本章では、各車両が通信に成功するまでの平均遅延と要求時間内に通信を成功させることのできる車両数の割合という観点から、提案手法を評価する。また、車両密度が高くビジー検知が多発した場合に要求時間 K を適応的に拡大することは、遅延の増大にもつながりかねないので、要求時間 K を拡大する場合の実用性についても評価する。表 2 に評価に用いたシミュレーション環境を示す。

我々は数十ミリ秒間隔での通信を想定しているため、交通流モデルは静的なモデルを仮定した。データサイズは 50 バイト、通信対象エリアに存在する車両数は 1~100 台、伝送レートは 1Mbps とした^(注1)。要求時間 K は 50 ミリ秒の場合に加え、要求時間 K を拡大する場合の実用性を評価するために 100 ミリ秒でもシミュレーションを行った。通信対象範囲に存在する車両数と各車が 1 回通信に成功させるまでに要する平均遅延 (以下、平均遅延) の関係を図 3 に、要求時間 K が 50 ミリ秒と 100 ミリ秒の場合の車両数と要求時間内に最低 1 度は通信に成功する車両数の割合 (以下、成功確率) の関係を図 4.5 に示す。

図 3.4 より、提案した式 (1) により制御することで、通信対象範囲に車両が 100 台存在する過密状況でも、平均遅延を要求時間 (50 ミリ秒) 以内に抑えつつ、ランダム値の上限を 50msec と固定した場合に比べ成功確率を 10%、ランダム値の上限を 5msec と固定した場合に比べ 9% 改善させられたことがわかる。通信対象となる車両が少ない場合は、チャンネルが使用されている可能性が低いので、式 (1) を使用しなくてもキャリアセンスまでの待ち時間を決定する際のランダム値の上限を小さく設定すれば遅延は抑えることができる (図 3)。しかし、車両数が増加すると、式 (1) を使用する場合に比べ、使用しない場合は平均遅延が増大し、成功確率が急激に低下する。一方、式

表 2 Simulation Condition

Packet size	50 [byte]
Transmission rate	1 [Mbps]
Process delay & Propagation delay	100 [μsec]
Required interval K	50, 100 [msec]
Number of vehicles	1 - 100

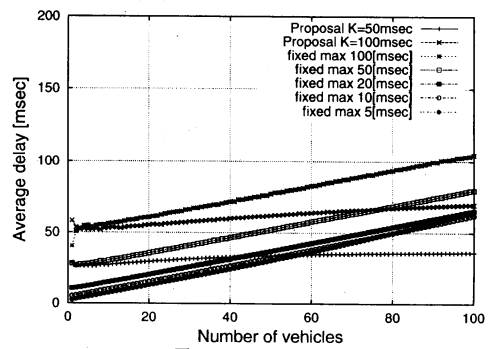


図 3 Average delay

(注1) : 現在 ETC に用いられている DSRC は実効 1.2Mbps 程度

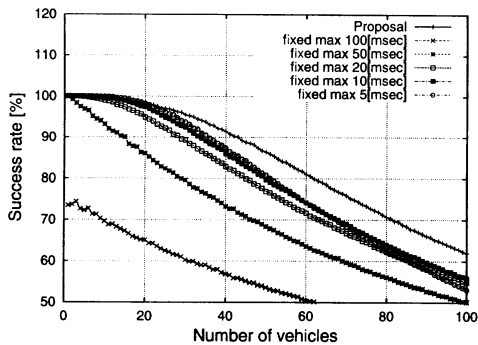


図 4 Success rate (Required time:50msec)

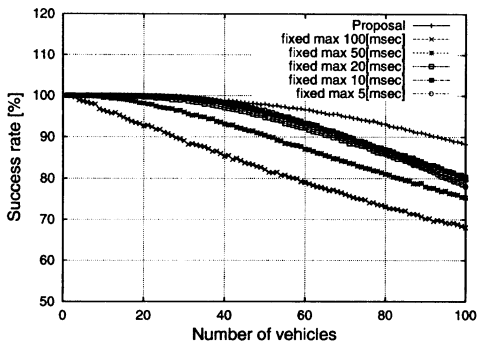


図 5 Success rate (Required time:100msec)

(1) を使用した場合は、たとえ通信対象となりうる車両数が 40 台を超える場合でも、遅延を要求時間 (50 ミリ秒) 内に抑えつつ、成功確率を 10% 近く改善可能なることがわかる。すなわち、式 (1) により時間効率を向上させることができ、本提案手法は通信対象範囲に高密度に車両が存在する場合に有効であり、かつ実用的であることがわかった。

図 5 は、通信対象範囲に存在する車両数に応じて、要求時間 K を広げることが有効であり、かつ数十ミリ秒間隔での通信が求められる車車間通信に利用可能であることを示している。図 4 では、要求時間 K が 50 ミリ秒の場合、たとえ式 (1) により待ち時間を制御しても、車両数が 62 台以上では成功確率が 80% を切ってしまう、高度車両制御システムには不十分であることを示している。しかし、図 5 では、要求時間 K を 100 ミリ秒と広げた場合、たとえ通信対象範囲に車両数が 100 台存在する場合でも、成功確率が 9 割近く (88.26%) に達していることがわかり、また遅延も 69.65 ミリ秒に抑えられたことがわかる (図 3)。すなわち、式 (1) の要求時間 K を広げた場合でも、安全運転支援を目的とした車車間通信が必要とされている数十ミリ秒での通信が可能であることがわかる。よって、通信対象範囲に 100 台存在するような過密状況で遅延を 70 ミリ秒以内に抑え、要求時間内に通信を成功させられる車両の割合を 9 割近くまで達成できたことで、周囲の車両密度に応じて、キャリアセンスまでの待ち時間を設定する際のアルゴリズムを制御することに加え、式 (1) の要求時間 K を制御するという考えが有効であり、かつ利用可能であることが確認できた。

5. まとめ

本稿では遅延の削減と送信成功確率の改善、すなわち信頼性の向上を目的とした車車間通信プロトコルを提案した。本提案プロトコルは、動的に変化する車車間のトポロジー変化に適応可能なコンテンション型プロトコル非持続型 CSMA を拡張し、周囲の車両密度に応じてキャリアセンスするまでの待ち時間を制御する。4 章でシミュレーションを用いて、各端末が通信に成功するまでの平均遅延と、要求時間内に最低 1 度は通信に成功する車両の割合という 2 つの観点から、本提案手法を評価し、その有効性、実用性を明らかにした。

今後の課題としては、今回はチャンネルがビジー状態である場合に次のキャリアセンスまでの待ち時間を設定する際の範囲のみを制御する方式を提案したが、今後はこの待ち時間を具体的に決定する数式や法則の最適解を求めたいと考えている。また、本稿の提案手法では、チャンネルのビジー検知が多発し、式 (1) を満たさなくなった場合は、その周期は送信失敗と判断するのみで、該当車両の次のキャリアセンスまでの待ち時間に特別な優先機能を持たせなかったが、今後は信頼性・平等性を持たせるために送信失敗端末の次の送信に対して優先機能を持たせることを検討する。また、評価手法に関してだが、今回は静的な交通モデルを用いてシミュレーションを行ったが、より現実的な評価を行うために、動的な、そして現実的で正確な交通モデルを用いて評価をしたいと考えている。これは、交通流の急激な変化、具体的には直進道路から混雑した交差点へ入るシーンなど急激に車両数が増える場合の MAC レベルでの対処が一つの課題となると考えているからである。この対処方法の 1 つとして、GPS から得る地図情報や交通情報を用いることにより、事前に交通流の変化を予想可能となり、より柔軟に対応できると考えられる。上記の課題とともに今後検討していく予定である。

文 献

- [1] Sadayuki Tsugawa, Shin Kato, Kiyohito Tokuda, Takeshi Matsui, Haruki Fujii, "A Cooperative Driving System with Automated Vehicles and Inter-Vehicle Communications in Demo 2000," Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems, 2001
- [2] Tushar Tank, Nathan Yee, and Jean-Paul Linnartz, "Vehicle-to-vehicle Communication for AVCS Platooning", IEEE Vehicular Technology Conference, 1994
- [3] Tomotaka Nagaosa, Takaaki Hasegawa, "An Autonomous Distributed Inter-vehicle Communication Network Using Multicode Sense CDMA," Proc. Int. Symp. on Spread Spectrum Techniques and Applications, 1998
- [4] Kiyohito Tokuda, Masami Akiyama, Haruki Fujii, "DOLPHIN for Inter-Vehicle Communications System," Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2000
- [5] Yasuhiko Inoue, Masao Nakagawa, "MAC Protocol for Inter-Vehicle Communication Network using Spread Spectrum," IEICE Trans. on Communications, 1994
- [6] Enkelmann, W, "FleetNet - applications for inter-vehicle communication," IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2003
- [7] Reichardt D, Miglietta M, Moretti L, Morsink P, Schulz W, "CarTALK 2000: safe and comfortable driving based upon inter-vehicle-communication," IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 2002