

連送数制御による隊列走行用タイムスロット予約方式

鈴木 理基^{1,a)} 徳田 大誠^{1,b)} 重野 寛^{1,c)}

受付日 2012年9月24日, 採録日 2013年5月18日

概要: 協調走行の一形態である隊列走行を制御するために高速, 高信頼の通信方式が必要とされているが, 既存手法では, 隊列密度が高い場合に輻輳や隠れ端末問題が発生する恐れがある. 本論文では CSMA/CA 方式にタイムスロットおよび予約方式を導入した隊列走行用タイムスロット予約方式を提案する. 自車両と周辺車両のスロット使用状況を監視し, 混雑度に応じて連送数を増減させ, 輻輳や隠れ端末問題を回避する. また, 隊列のマスタ車両がメンバ車両分も合わせてタイムスロット予約し, メンバ車両間の予約競合を回避する. シミュレーションでは, 片側 1 車線の直線道路における双方向通行で, 隊列流入量が 250 platoon/h という厳しい条件下において, 提案方式と既存方式を比較した. その結果, 既存方式での情報伝達率 0.79, 隊列維持率 0.54 に比べ, 提案方式ではそれぞれ 0.88, 0.62 であり, その有効性を確認した.

キーワード: ITS, 隊列走行, タイムスロット予約方式

Time Slotted Communication Method for Platoons Using Rate Control

MASAKI SUZUKI^{1,a)} TAISEI TOKUDA^{1,b)} HIROSHI SHIGENO^{1,c)}

Received: September 24, 2012, Accepted: May 18, 2013

Abstract: In this paper, we propose an efficient vehicle to vehicle communication method for platoons. When vehicles organize and keep a platoon, the vehicles are required to frequently exchange their own driving information among the platoon members at short intervals. In the existing methods, vehicles replicate a packet and send one after another in order to improve the information exchange ratio. The existing methods, however, possibly cause the congestion and the hidden terminal problem when platoons densely drive. Thus, this paper proposes a CSMA/CA communication method using reservation time slots, representative reservation and rate control. With the proposed method, the vehicles control the number of repetitive transmission according to the occupancy of the slots. Also, the representative vehicle within a platoon reserves and assigns the other platoon members' slots. The proposed method is evaluated through the simulation. In case of the condition such as the platoon inflow is 250 platoon/h and on the straight road which has one lane each way, the proposed method shows that the data arrival ratio is 0.88 and the platoon maintenance ratio is 0.62 while the existing methods shows 0.79 and 0.54 respectively.

Keywords: ITS, platooning, time slot reservation

1. はじめに

近年, 環境負荷を軽減することへの社会的要請から自動車交通の円滑化, 効率化が期待されている. 次世代道路交通システムにおける自動車交通円滑化の有効手法として,

協調走行の一形態である隊列自動走行 [1], [2], [3] があり, 日本自動車研究所 (JARI) は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) と連携し, そのエネルギー ITS 推進事業で, 自動車の隊列走行の研究を進めている [4], [5].

この隊列走行では, 自動運転によるスムーズな加減速の実現や不必要なアクセルワークの軽減, 短い車間距離走行の維持にともなう空気抵抗低減による燃費改善, さらには車間距離短縮による道路容量増加と交通流円滑化などにより, 二酸化炭素排出量の削減効果が期待されており, 鍵となる車車間通信の高速, 高信頼化が隊列走行実現での焦点の

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) masaki@mos.ics.keio.ac.jp

b) its@mos.ics.keio.ac.jp

c) shigeno@mos.ics.keio.ac.jp

課題となる。隊列走行を想定した通信にはこれまで、IEEE 802.11p 標準 [6] ならびに車車間通信システムの実験用ガイドライン RC-005 が用いられ、いずれも CSMA (Carrier Sense Multiple Access)/CA (Collision Avoidance) 方式に準拠している。一般に CSMA/CA 方式を用いた車車間通信には、車両どうしでの頻繁な情報交換が必要となる。その通信範囲内に複数の隊列が存在し、対向方向にも走行するため、隊列密度の高い環境ならびに隊列内車車間通信で特定車車間に通信が偏る環境などでは、通信帯域の圧迫や、隠れ端末問題 [7] が発生し、隊列を構成するのに必要な通信が実現できない現状がある。また GPS 時計の進歩により、隠れ端末の影響を受けない方式とされる TDMA 方式は、車両間同期精度が向上し、その実現可能性が注目を集めているが、通信負荷を回避する仕組みはない。本論文では、スムーズな隊列走行を可能とする車車間通信を高速かつ高信頼で実現するため、CSMA/CA 方式ですべての車両が周期的に通信できるように、隊列走行用タイムスロット予約方式の導入を提案し、既存の CSMA/CA 方式および RR-ALOHA 方式との比較検討を行い、提案の有効性を示す。

以下に 2 章で隊列走行とそこで想定される通信の概要、ならびに隊列走行通信に関する従来研究の状況を明らかにする。次いで 3 章で、隊列走行の車車間通信で懸念される輻輳と隠れ端末問題を回避するため、各車両が周期的に情報伝達可能なように、CSMA/CA 方式にタイムスロット予約の機能を導入することを提案する。4 章でシミュレーションにより、提案方式を既存方式と比較検討し、情報伝達率ならびに隊列維持率の観点からその有効性を確認する。最後に 5 章で、結論と今後の課題を要約する。

2. 隊列走行と通信方式

2.1 隊列走行と通信

隊列走行とは同一方向に走行する複数車両が縦列に車群を形成し、一定の短い車間で走行する協調走行の一形態である。空気抵抗や不要な加減速を低減させ、道路容量を向上させるため、環境負荷軽減効果があると期待されている。エネルギー ITS 推進事業では、大型トラック 3 台から 5 台による隊列を高速道路上で車間距離 4m を維持しながら、80 km/h で自動走行する技術の確立を目標としている [5]。

隊列走行の実現にあたっては、車間距離を詰めた状態でも人手を介さず安全走行を実現するために、隊列を形成する車両間で短周期の情報交換が必要であり、自動運転技術とともに車車間通信が重要となる。また、同じ隊列を構成する車両間で隊列内順番、実速度、実加速度、実走行位置座標、目標速度、ハンドル操舵角、回頭角度などの情報を 50 byte のデータサイズにまとめ、20 msec 間隔で情報を伝達し合うことが求められている [8]。さらに、たとえば隊列走行中に緊急停止する場合、停車意思を先頭車両から最後尾まで順次伝え、その結果の減速動作開始を最後尾車両

One platoon communication sometimes affects on another communication. Network congestion is possibly caused when platoons densely drive.

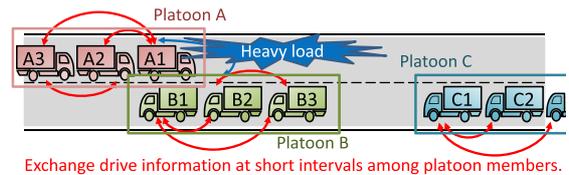


図 1 隊列走行の概念図

Fig. 1 Conceptual image of platoon.

から先頭車両まで順次伝達し、本情報のキックバックは 100 msec 以内の達成が要件とされている。車車間通信規格には、欧米では IEEE802.11p, 国内では車車間通信システムの実験用ガイドライン (RC-005) が存在するが、ネットワークトポロジが激しく変化する車車間通信の特性に対応するため、いずれも CSMA に準拠し、各車両が自律分散的にフレーム衝突を避け、安定した通信を可能としている。

隊列走行の解析では、隊列の形成、走行、解散の仕組みが重要な課題となる。また、走行時の通信では、隊列内のメンバー間通信、道路内に複数の隊列が存在する際の隊列相互間通信など様々な課題が想定される。しかし研究開発の現状は、隊列の形成や解散に先駆けて隊列単独走行時の検討が開始された段階にある。したがって本論文における隊列走行は、安定した隊列を維持する定常状態を対象とし、隊列の開始ならびに解散の動作は含まないものとする。図 1 に隊列走行の概念図を示す。図中、複数の隊列による交互走行の有無、隊列構成車両台数の相違、一定エリア内の隊列密度など各種のバリエーションが想定される。特に、CSMA/CA の通信では、一定領域内に複数の隊列が存在する場合にはチャンネル競合、利用帯域の制限など輻輳の発生も予想される。

2.2 隊列走行通信の従来研究

これまで隊列走行通信の解析はあまり報告されておらず、エネルギー ITS 推進事業で採用されている「連送」[8] と呼ばれる方式が現状では最も実用に近いとされている。この方式は短周期での車両間情報交換を実現するために、隊列走行に必要な走行位置や速度などの情報を MAC 層で複製し、同一情報の連続送信により、情報伝達率の向上を図るものである。複製パケットのうち 1 つでも宛先に到着すれば情報伝達成功と見なせるため、たとえば 1 つの情報を 5 連送する場合には、MAC 層のパケット到着率が 70.0% の場合であっても、情報伝達率を理論上 99.8% まで向上させられる。しかしながら、複数の車両で構成される隊列が複数走行し、また、隊列どうしのすれ違いも発生するような隊列密度が高い場合には、隊列内通信が周囲の隊列内通信を圧迫し、輻輳を引き起こすことが予測される。さらに、隊列どうしの位置関係によっては隠れ端末が発生し、特定の隊列の情報伝達率が周囲の隊列と比較して低下する場合

も考えられる。

輻輳を低減させる手法として IEEE 802.11p のオプションにコンテンツフリーチャネルアクセス方式がある。各車両の送信タイミングを車両間で事前合意しておくことで、短いガードインターバルで情報を送信するが、タイミングの事前合意にはアクセスポイントなどによる集中管理機構が必要とされている [9]。一方、隠れ端末問題の影響を受けない方式として TDMA 通信方式を車車間通信で実現する手法も提案されている。RR-ALOHA 方式 [10], [11] は R-ALOHA 方式 [12] を VANET 用に適用したもので、各車両にタイムスロットを割り当てる方式である。ネットワークトポロジが激しく変化する VANET ではタイムスロットを集中管理できないため、予約方式により各車両が空スロットの使用を周囲に通知しながら確保することで分散的かつ短いスタートアップ時間を実現している。Scopigno らが検討した Mobile Slotted Aloha 方式 [13] は、RR-ALOHA 方式を拡張しており、スロットの BUSY フラグに CLS フラグをあわせて使用することで、隠れ端末による衝突を明示的に周囲に伝え、車両密度が高い状況で必要以上にスロットを BUSY と判断する現象を回避し、少ないオーバーヘッドで効果的に空スロットを使用可能とした。また、フレーム周期ごとではなく短時間で他車両から受信した古い情報を破棄することで、BUSY から FREE に状態が遷移したスロットを効果的に使用可能とし、高い車両密度、激しいモビリティ下でも正常に動作するように改善した。さらに、牧戸らが検討した自律分散型 TDMA プロトコル [14], [15] では、パケット衝突と伝送エラーを区別することにより、伝送エラーが頻繁に発生する環境下でも不必要な再予約を回避し、安定動作を可能とした。

これらのタイムスロット方式では、輻輳が発生した際に割当て可能なスロットがないため回避手段がとれず、自身が持つ伝送帯域以上に通信トラフィックが存在する場合のパケット到着率が激しく低下する可能性がある。また、互いに存在を知らない車両どうしが異なるタイムスロットを用いる仕組みであるため、隠れ端末の関係にある車両どうしのパケット衝突は回避できるが、通信負荷が地理的に偏り、特定車両の帯域を圧迫したときにその車両の帯域負荷を低減させる手段がないため、特定隊列のパケット到着率が不均一で、かつ低くなりうる。さらに、各隊列が複数車両により構成されているため、スロット数に余裕がない状況でスロット予約する場合に、隊列を構成する車両どうしで予約が衝突する恐れもある [16]。

以上から、既存の CSMA/CA 方式ならびに TDMA 方式とも単独では隊列走行を維持するための情報伝達用通信方式には不十分であることが分かる。しかしながら、混雑した通信環境下でも各車両が比較的高信頼性を維持できる CSMA/CA 方式の利点とスロット割当てに集中管理機構を介さず、一定周期で情報交換できる TDMA 方式の利点

をあわせ持つことができれば、隊列走行用の高速かつ高信頼通信の実現が期待できる。

3. 隊列走行用タイムスロット予約方式の提案

隊列走行用通信を高速かつ高信頼に実現するための隊列走行用タイムスロット予約方式を提案する。以下、CSMA/CA チャネルのタイムスロット化と擬似 TDMA フレームの導入、連送数制御による輻輳回避、代表車両スロット予約に焦点をあて説明する。

3.1 CSMA チャネルのタイムスロット化と TDMA フレームの導入

本方式は CSMA/CA 方式をベースにタイムスロット予約方式を導入する。シングルチャネルにおいて帯域を一定サイズのタイムスロットに分割し、その使用を RR-ALOHA 方式と同様に周囲に通知することにより情報を送信する。CSMA/CA 方式における初回情報送信時のバックオフ時間を 0 にすることで、車両間の時間同期が高精度の場合にはタイムスロット予約方式で情報伝達し、時間同期の精度が低い場合には CSMA/CA 方式の再送手順であるコンテンツンメカニズムを用いて情報伝達する。

全車両間は高精度で時間同期するため GPS 時計の搭載を想定し、スロット同期をとる。連続一定数のタイムスロットから擬似 TDMA フレームを構成し、先頭車両（以下、マスタ車両）がフレームの先頭スロットを使用する。他車両はフレームの先頭スロットを識別することで、隊列内車両間でフレーム同期をとる。このフレーム開始タイミングは隊列ごとに異なってもよい。図 2 に各々 2 台で構成される隊列 A, B が、同一チャネルを 20 タイムスロットの擬似 TDMA フレームで構成する場合のスロットとフレーム同期例を示す。

擬似 TDMA フレームサイズは隊列走行用通信の情報更新周期と等しく、連送数と同数のタイムスロットで複製

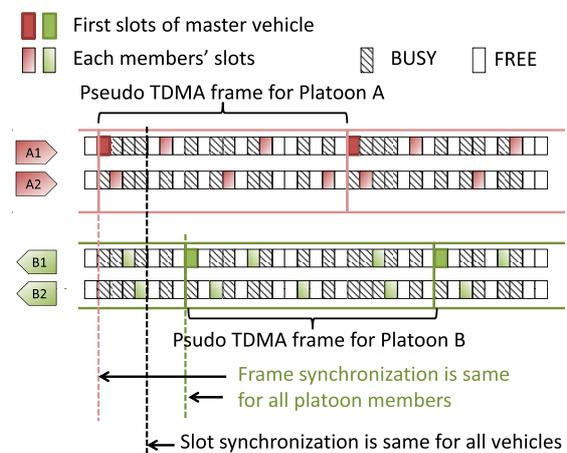


図 2 CSMA チャネルのスロット同期とフレーム同期例
Fig. 2 Slot and frame synchronization in CSMA channel.

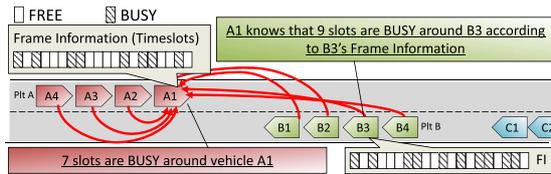


図 3 タイムスロット使用状況通知の概要

Fig. 3 Time slot usage information.

パケットを送信し、連送する。この際、連送に使用するスロットは、同一フレーム内であれば連続していなくてもよいものとする。各車両は実速度などの隊列走行用の情報以外に、各車両が観測した直近 1 フレーム分のスロット使用情報と連送数を格納し、情報交換する。

各車両は 1 hop 通信範囲内車両（以下、周辺車両）からのパケット受信ごとに、送信車両から送られてきたフレーム情報を検査し、自車両を含め隊列内外の輻輳を検知し、連送数を制御して高い情報伝達率を維持する。図 3 にタイムスロット使用情報交換の概要を示す。図では、車両 A1–A4, B1–B4, C1–C2 がそれぞれ隊列を構成する。A1 で観測されるタイムスロットは通信可能エリア内にいる同一隊列内の A2–A4 ならびに対向車線の隊列 B の B1–B4 が使用するタイムスロットを含むことを示し、また、B3 で観測されるタイムスロットは同一隊列内の B1, B2, B4, 隊列 A の A1–A4, 隊列 C の C1, C2 が使用するタイムスロットを含むことを示す。A1 は B3 からパケットを受信すると、B3 のフレーム情報を知り、B3 の輻輳度や B3 が A1 からは観測できない車両からの情報を受信しているという、いわゆる隠れ端末の存在を知る。この結果、各車両は自動的に自車両と周辺車両の輻輳状況を把握して、送信状況を制御することが可能となる。送信状況を基に連送数を制御することで輻輳を回避し、マスタ車両が代表車両スロット予約することで隊列メンバー車両のスロットを予約し、割り当てる。

3.2 連送数制御による輻輳回避

自車両と周辺車両の輻輳状況から、各車両のスロット使用率と連送数の加減判定閾値を比較し、情報更新周期ごとに連送数を制御することで輻輳を回避する。ここで、車両 k の連送数決定アルゴリズムを図 4 に示す。車両 k の通信範囲内に存在する車両数 I , 連送数の最大値 N_{max} ならびに最小値 N_{min} , スロット使用率で輻輳を回避するための閾値 Th_1 , 閑散と判定する閾値 Th_2 を入力とし、車両 k の連送数を出力とする。アルゴリズムは、車両 k が受信した各車両が観測するスロット使用情報 O_i を検査し、その 1 台でも混雑と判定した場合、最小値を下限として連送数を減少させる。すべての車両が混雑しておらず、かつ少なくとも 1 台が空いていると判定した場合、最大値を上限として連送数を増加させる。それぞれの判定はスロット使用情報と閾値の比較によって行う。

INPUT:

- I : Set of vehicle IDs whose packets reach vehicle k
- O_i : Occupancy of $V_{i \in I}$'s slots ($= \frac{\text{Number of Busy of } V_i}{\text{Number of Slots of } V_i}$)
- N'_k : $\begin{cases} \text{Initial value (start platooning)} \\ \text{Number of transmission for vehicle } k \text{ in previous (otherwise)} \end{cases}$
- N_{max} : Maximum number of repetitive transmission
- N_{min} : Minimum number of repetitive transmission
- Th_1 : Threshold for congestion avoidance
- Th_2 : Threshold for emptiness
- n : Number of change

OUTPUT:

- N_k : Number of transmission for vehicle k

VARIABLE:

- d_k : $\begin{cases} -1 & (\text{increment of slot number}) \\ 0 & (\text{same slot number as previous, initial value}) \\ 1 & (\text{decrement of slot number}) \end{cases}$

$d_k \leftarrow 0$

for all i such that $i \in I$ do

if $O_i > Th_1$ then

$d_k \leftarrow 1$

break

else if $O_i < Th_2$ then

$d_k \leftarrow -1$

end if

end for

if $d_k = 1 \wedge N_k - n \leq N_{min}$ then

$N_k \leftarrow N'_k - n$

else if $d_k = -1 \wedge N_k + n \geq N_{max}$ then

$N_k \leftarrow N'_k + n$

end if

図 4 連送数決定アルゴリズム

Fig. 4 Algorithm for deciding number of repetitive transmission.

3.3 代表車両スロット予約

隊列どうしがすれ違う、あるいは追い越すことで複数の隊列間でスロットが競合する場合ならびに連送数に対して予約数が不足する場合に、各車両はその不足分用スロットを新たに使用可能にする。このとき、隊列走行するメンバー車両の相対位置は変わらないという特性から、本方式では、隊列内メンバーのスロットはマスタ車両が代表して予約し、割り当てる集中管理機構を導入する。代表車両がメンバー車両分も予約し、割り当てることにより、隊列内メンバー間で予約数の偏りをなくし、隊列を構成する車両どうしでのスロット競合を回避できる。そのため隊列走行開始時と隊列メンバー車両から情報を受信した際に代表車両はまず、(a) 自車両とメンバー車両のフレーム情報と必要連送数情報を収集し、必要予約スロット数を決定する。次に、(b) フレーム情報と予約スロットリストから空スロットを知り、予約スロットを決定し、予約パケットを送信する。その後メンバー車両は (c) 代表車両の予約パケットをオーバヒアし、隊列内の自車両 ID から自律的に自車両に割り当てられたスロットを判断し、使用する。以下にその概要を説明する。

(a) 代表車両における必要予約スロット数決定

自隊列割当てスロットの競合は、代表車両が検知する場合とメンバー車両が通知する場合がある。そのため各車両は観測するフレーム使用状況をフレーム情報として連送数とともに情報内に格納し、車両間で交換する。図 5 に代表車

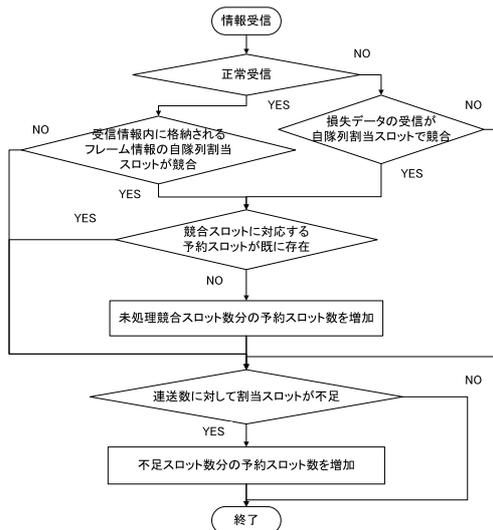


図 5 代表車両による情報受信時の予約スロット数決定処理フロー
 Fig. 5 Execution flow for deciding reservation slot by representative vehicle in case of receiving information.

両による情報受信時の予約スロット数決定処理フローを示す。代表車両は情報を受信するとデータ損失の有無で正常に受信したかを判定する。正常に受信した場合はメンバー車両における自隊列割当てスロットの競合を検知するため、受信情報内に格納されるフレーム情報の自隊列割当てスロットが競合しているかを検査する。一方、正常に受信しなかった場合は損失データの受信が自隊列割当てスロットでの競合かを検査する。ここで、いずれの検査でも、自隊列割当てスロットが競合していない場合は現状のスロットを維持し、自隊列割当てスロットが競合している場合は、該当スロットに対応する予約スロットがすでに存在しているかを判定する。これは、複数の車両で検知されるスロット競合を重複して予約しないためである。全該当スロットが対応済みである場合は新たな予約スロットを増やさないが、未対応のスロットが存在する場合は未処理の競合数分の予約スロット数を増加させる。競合による予約必要数を判定した後、メンバー車両ごとに連送数に対して割当てスロットが不足しているかを判定する。割当てスロットが不足している場合は、不足スロット分だけ予約スロット数を増加させる。

(b) 代表車両における予約スロット決定と送信

(a) の処理で確定した予約スロット数分のスロットを選択し、予約パケットを送信する。複数スロットで競合が発生した場合に、代表車両はそれぞれの予約スロットが重複しないように空スロットを選択する。このため、代表車両は予約スロットをリストにして保持し、自車両ならびにメンバー車両のフレーム情報と OR 演算し、すべてのリストに共通して使用していないスロットを空スロットと判定する。その中から予約スロットをランダムに選択し、予約スロットリストに追加する。代表車両は予約スロットリストの時

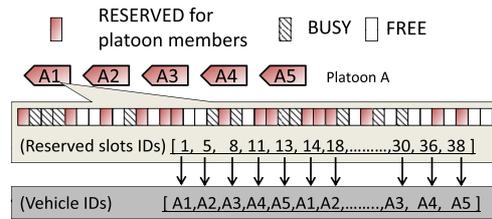


図 6 代表車両による連送スロット予約例
 Fig. 6 Example of slot reservation by representative vehicle.

刻に予約パケットを送信する。ここで、予約スロットが同一通信範囲内の他隊列と競合した場合には、不足スロットまたは衝突スロットとして検知し、再度同様のフローで予約スロットを決定し、予約パケットを送信する。

(c) メンバ車両における予約スロットの割当て

メンバー車両は代表車両が予約したスロットをオーバヒアし、代表車両が予約したスロットをリストにする。各メンバー車両は自隊列の構成車両台数と自車両 ID をあらかじめ知っており、車両 ID が j の車両はリスト上で式 (1) を満たす i 番目のスロットが自車両に割り当てられたと判断する。

$$i \bmod N = j \tag{1}$$

ここで、 N は隊列構成車両台数、 j は自車両の隊列内 ID 番号を示す。図 6 にスロット数 40 の場合の代表予約例を示す。図では車両 A1 が代表予約し、成功したスロットの ID (1, 5, 8, ..., 38) を各車両が観測し、先頭車両 A1 から順番にスロットが割り当てられている。

4. 隊列走行用タイムスロット予約方式の評価および考察

隊列走行用タイムスロット予約方式を従来方式である単純連送方式、RR-ALOHA 方式と比較検討する。

4.1 比較対象およびシミュレーション条件

通信シミュレータ Scenargie 1.4 [17] と交通流シミュレータ ADVENTURE Mates Version 0.11 beta [18] を並列実行する環境を用いた。交通流シミュレータで車両流入量から車両の位置を計算し、その結果に基づいて通信シミュレータは無線通信の成否を判定し、パケット到着率や情報伝達率を算出する。車両はドライバモデルに従って行動し、車両間通信の結果に基づいて交通流シミュレータは次の微小時間後の車両位置を計算する。

隊列走行に必要な通信は文献 [8] に準じ、50 byte の情報を 20 msec 周期で更新することを想定する。通信条件は、通信プロトコルスタックやドライバの反応などを統合的にシミュレーションする際の標準的な条件とされる文献 [19] の「第 4 章 環境シミュレーションシナリオ」大型トラックの高速道路における隊列走行シナリオに準拠する。その主なシミュレーション条件を表 1 に示す。また、単純連送方式ならびに RR-ALOHA 方式での連送数ならびに提案方

表 1 主なシミュレーション条件
Table 1 Simulation parameters.

Communication	
Simulation parameters	Value or reference
Simulator	Scenargie 1.4
Payload Size	50 Bytes
Transmission Cycle	20 msec
Number of repetitive transmission	5 times
PHY layer	802.11p
Frame size	20 msec
Number of slot	40 slot/frame
Modulation Scheme	OFDM (QPSK 1/2)
Transmission Power	20 dBm
Band Frequency	5.9 GHz
Bandwidth	10 MHz
Bit Rate	6.0 Mbps
Propagation Model	ITU-R_P.1411
Modulation Scheme	OFDM (QPSK1/2)
Traffic	
Simulation parameters	Value or reference
Simulator	ADVENTURE Mates Version 0.11 beta
Intervals between Trucks	4 m
Road Length	10.00 km
Road Width	3.5 m
Size of Trucks (W, L, H)	2.5 m, 12 m, 3.8 m
Number of Platoon members	5 vehicles
Mobility	variable

式での最大連送数をそれぞれ5とし、1度に増減する連送数は1とした。RR-ALOHA方式ならびに提案方式のフレーム、スロット数は単純連送方式と同等の最大送信速度になるよう定めた。シミュレーションで重要となるBER (Bit Error Rate) も同様に文献 [19] で採用されたモデルを使用する。見通しの良い環境下での信号到達距離は約500mであり、車両による伝播遮蔽はないものとした。また、全車両の時間同期は十分に高い精度とした。

以下ではまず、隊列走行通信の有力方式である単純連送方式において、モビリティのない状態の packets 到着率を測定し、この方式が内包する輻輳と隠れ端末に起因する地理的な通信負荷の偏りを確認する。また、モビリティのない状態で隊列走行通信の有力方式である従来の単純連送方式ならびにRR-ALOHA方式と提案方式との比較検討を行う。次いで、実際に高速道路上を複数の隊列が双方向に移動する現実の交通状況に合致したモビリティある交通流モデルで情報伝達率と隊列維持率を比較検討する。

4.2 モビリティのないシナリオでのシミュレーション

直線道路上に一定の間隔で隊列を配置し、隊列間車頭距離 (Headway distance between platoons: 隊列の先頭車両から次の隊列の先頭車両までの距離) を変化させ、隊列ごとにMAC層 packets 到着率およびアプリケーション情報伝達率を測定する。

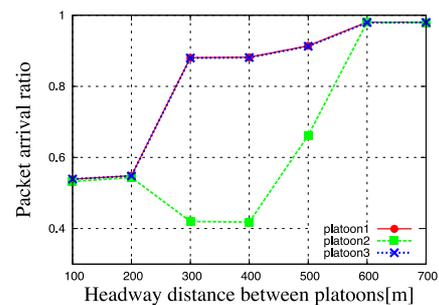


図 7 3 隊列の隊列間車頭距離と packets 到着率の関係
Fig. 7 Packet arrival ratio vs headway distance b/w 3 platoons.

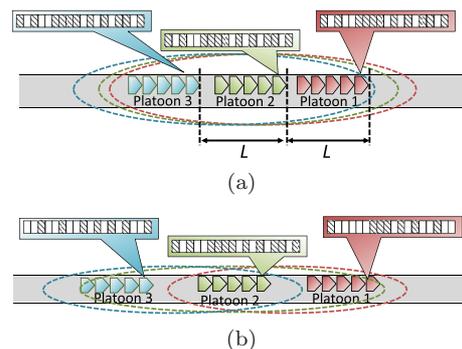


図 8 隊列位置と通信範囲ならびに通信負荷の関係。(a) 複数隊列の通信負荷が等しい場合、(b) 複数隊列の通信負荷に偏りがある場合

Fig. 8 Relation between platoon position, communication range and communication load. (a) The case of same communication load, (b) The case of partial communication load.

(a) 単純連送方式における隊列間車頭距離と MAC 層 packets 到着率の関係

構成車両数5台の3隊列を直線に配置し、単純連送方式が直面している輻輳と隠れ端末に起因する通信負荷の偏りを明確化する。ある隊列 k の MAC 層 packets 到着率 P_{sk} を式 (2) に示す。

$$P_{sk} = \frac{\sum_{i=1}^{N_v} p_i}{N_v}, \quad (2)$$

ここで、 N_v は隊列を構成するメンバ車両の台数 (= 5)、 p_i は隊列内の他メンバから受信した packets 数、 S_i は各車両が送信した packets 数である。

図 7 に単純連送方式での3隊列の隊列間車頭距離と packets 到着率の関係を示す。隊列間車頭距離が600m以上の場合、隊列間で通信が干渉せず、等しく高 packets 到着率を得る。一方、隊列間車頭距離が100–200mの場合、すべての隊列に等しい通信負荷がかかることで輻輳が発生し、各隊列は等しく0.53で低 packets 到着率となる。図 8(a) に複数隊列の通信負荷が等しい場合の隊列位置と通信範囲ならびに通信負荷の関係を示す。ここで、隊列間車頭距離を L とする。図 8(a) では隊列間距離が小さく、ある車両が packets を送信する場合に、他車両がその帯域あるいは

スロットを使用し、送信できない確率が高い。すなわち、通信要求過多である輻輳が発生し、結果として各隊列は低パケット到着率になる。

また、隊列間車頭距離が 200-600m の場合、隠れ端末に起因する通信負荷の偏りが発生し、隊列 2 は隊列 1, 3 に比べ低パケット到着率を示す。たとえば隊列間車頭距離が 300m の場合、隊列 1, 3 のパケット到着率は等しく 0.88 を示し、隊列 2 のパケット到着率は 0.43 である。図 8(b) に複数隊列の通信負荷に偏りがある場合の隊列位置と通信範囲ならびに通信負荷の関係を示す。両端の隊列 1, 3 の通信範囲には 2 隊列存在し、中間の隊列 2 の通信範囲には 3 隊列存在する。この場合、図 8(a) の場合よりも隊列 1, 3 の送信機会が多く、隊列 2 の送信機会は少なくなる。この結果、隊列 2 のパケット到着率は図 8(a) に比して低下する。地理的に通信負荷が偏った状態で隊列 2 の帯域を圧迫することは、隊列 1 と隊列 3 がお互いの隊列の存在を検知できないことで引き起こされると考えられる。

以上より、隊列間車頭距離が短い場合に輻輳や隠れ端末に起因する通信負荷の偏りを確認でき、隊列密度が高い環境においてすべての隊列が短い周期かつ高い信頼性情報交換を実現するためには、輻輳や隠れ端末に起因する通信負荷の偏りを回避する通信方式が必要であることが分かる。

(b) 隊列間車頭距離と情報伝達率の関係

次に隊列数を 5 とし、単純連送方式がかかえる課題である輻輳や隠れ端末に起因する通信負荷の偏りに対する提案方式の効果を RR-ALOHA 方式と比較し、検討する。ある隊列 k のアプリケーション情報伝達率 R_{sk} を式 (3) に示す。

$$R_{sk} = \frac{\sum_{i=1}^{N_v} \frac{r_i}{T_i}}{N_v} \tag{3}$$

ここで、 N_v は隊列を構成するメンバ車両の台数 (= 5)、 r_i は隊列内の他メンバから受信した情報数、 T_i は各車両が送信した情報数である。

図 9 に単純連送方式の隊列間車頭距離に対する情報伝達率を示す。隊列間車頭距離が 300m 以上の場合、すべての隊列において高い情報伝達率を示すが、隊列間車頭距離が 100m の場合、全隊列で輻輳が発生し、情報伝達率が 0.8 から 0.95 を示す。隊列間車頭距離が 150-300m の場合、隠れ端末による通信負荷の偏りが発生し、隊列 3 の到着率が

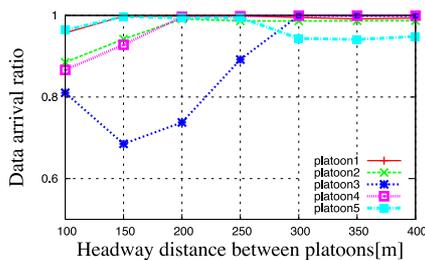


図 9 情報伝達率 (単純連送方式)

Fig. 9 Data arrival ratio by simple repetitive transmission.

低く、隊列 1, 5 の情報伝達率が高い。この際、隊列 2, 4 はその中間の値を示す。

図 10 に RR-ALOHA 方式を用いた際の隊列間車頭距離に対する情報伝達率を示す。全体に図 9 の単純連送方式と同傾向を示すが、RR-ALOHA 方式はバックオフやコンテンツンメカニズムがないことにより帯域を効率良く使用できるため、隊列間車頭距離が 150-250m の場合に、中央の隊列での情報伝達率低下が抑えられる。単純連送方式と同様に、隊列間車頭距離が 100m の場合、輻輳が発生するため全隊列の情報伝達率が低下し、隊列間車頭距離が 300m 以上の場合、全隊列が高い情報伝達率で通信する。

図 11 に提案方式の隊列間車頭距離に対する平均連送数と情報伝達率を示す。提案方式はどの隊列間車頭距離においても全隊列が約 1 の高情報伝達率を示す。図で明確なように本来は高い到着率を維持する目的である連送数を、輻輳発生時には低くすることで輻輳を避け、高情報伝達率を維持している。また、周辺車両のスロット使用率を監視し、周辺車両での輻輳発生時に連送数を低くすることで、隠れ端末に起因する通信負荷の偏りを回避し、周辺車両の情報伝達率の低下を回避している。

図 9, 10, 11 を比較すると、隊列間車頭距離が 100m の場合、単純連送方式や RR-ALOHA 方式では輻輳が発生し、中央に近い場所にいる隊列ほど低い情報伝達率を示すが、提案方式では輻輳の影響が軽減され、高情報伝達率を示す。また、隊列間車頭距離が 150-250m の場合、単純連送方式は前提条件である 20msec 内に 1 つもパケットが到着しない場合が多いため、中央の隊列が周囲の隊列に比べ

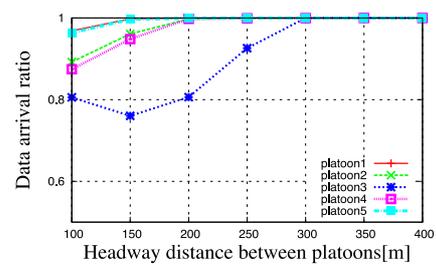


図 10 情報伝達率 (RR-ALOHA 方式)

Fig. 10 Data arrival ratio by RR-ALOHA method.

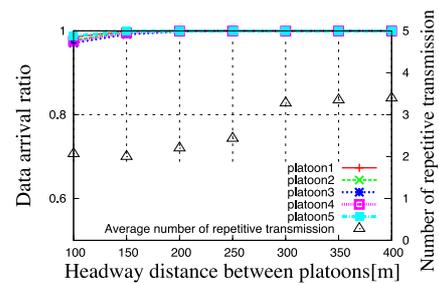


図 11 情報伝達率と平均連送数 (提案方式)

Fig. 11 Data arrival ratio and average number of repetitive transmission by proposed method.

低い情報伝達率を示し、正常に隊列内車両間で情報交換できていない。RR-ALOHA 方式は単純連送方式に比べ効率良くスロットを割り当てるため、単純連送方式よりも高い情報伝達率を示しているが、輻輳や隠れ端末に起因する通信負荷の偏りに十分に対応していないと考えられる。これに対して、提案方式では自車両の帯域におけるスロットと、周囲に存在する車両の帯域におけるスロットの利用度を監視し、隊列の密度が高くなり、いずれかが混雑した場合にも情報の複製数を一時的に減らすので、輻輳時の情報伝達率を改善し、隠れ端末に起因する通信負荷の偏りを回避し、高情報伝達率を示すことができる。

4.3 モビリティのあるシナリオでのシミュレーション

現実に近い環境で評価するため、車両にモビリティを持たせた交通流を発生させ、高速道路を想定した直線道路で、片側 1 車線の双方向通行とするシミュレーションを実施した。道路を走行する車両はトラックのみとし、全車両がいずれかの隊列に属していることとする。各隊列の運動は安定して隊列走行を維持した定常的なものとする。ここで、車両は直線道路の端点から流入し、道路上を 80 km/h を目標に走行し、他方の端点から流出する。シミュレーションは 1,000 秒（シミュレーション時間）経過した定常状態になってから測定を開始し、その時刻を 0 秒として図示する。

本シミュレーションでは、発信元車両から送信される情報が受信車両に伝達する情報伝達率と、隊列を構成する全車両が 20 msec 以内に情報を取得できるかを判別する隊列維持率という 2 つの観点から評価する。これは、文献 [8] で規定される 20 msec 以内の情報交換が隊列の全メンバー間で達成されるか否か確認するためである。

(a) 隊列流入量と情報伝達率の関係

現実に近い交通状況下で、隊列の流入量を変化させた場合、特定の車両間での情報伝達の信頼性を示す指標であるアプリケーション情報伝達率を測定する。隊列あたりのアプリケーション情報伝達率 R_d を式 (4) に示す。

$$R_d = \frac{\sum_{k=1}^P R_{sk}}{P} = \frac{\sum_{k=1}^P \sum_{i=1}^{N_v} \frac{r_{ki}}{T_{ki} N_{kv}}}{P}, \quad (4)$$

ここで、 R_{sk} は隊列 k の情報伝達率（式 (3)）、 P は道路上の隊列数、 N_{kv} は隊列 k 構成メンバー数（= 5）、 r_{ki} は隊列 k 内他メンバーからの受信情報数、 T_{ki} は隊列 k 内各車両の送信情報数である。

図 12 に隊列流入量と情報伝達率の関係を示す。隊列流入量が低く 50–100 platoon/h の場合、各手法で約 1 という高情報伝達率となる。RR-ALOHA 方式および単純連送方式では、120 platoon/h（平均隊列間車頭距離 667 m 相当）を超えると隊列流入量の増加にともなって情報伝達率が低下する。提案方式は、他の手法に比して高い値を維持し、200 platoon/h（平均隊列間車頭距離 400 m 相当）でも情報伝達率は 0.96 を超える。さらに隊列流入量が増加すると情

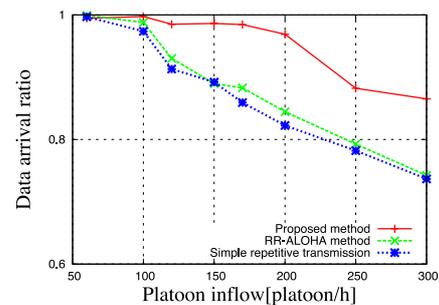


図 12 隊列流入量と情報伝達率の関係

Fig. 12 Relation between data arrival ratio and platoon inflow.

報伝達率は低下するが、隊列流入量が 300 platoon/h のときに RR-ALOHA 方式と比して平均 11%改善されている。

以上から、現実に近いモデルでは、隊列流入量が小さい場合には手法間で差はないが、提案方式では平均的な流入量と想定される隊列流入量が 120 platoon/h を超える高密度な環境でも有効に動作すると考えられる。

(b) 隊列流入量と隊列維持率の関係

隊列維持率 (P_d) はある時点に道路上を走行する全隊列に対して隊列を維持する通信に成功している隊列の割合を示し、隊列維持時間率 (P_t) はある隊列の測定時間に対する隊列走行維持時間の割合を示す。 P_d を式 (5) に、 P_t を式 (6) に示す。

$$P_d = \frac{P_m}{P}, \quad (5)$$

$$P_t = \frac{T_{\text{platoon}}}{T}, \quad (6)$$

ここで、 P は道路上の隊列数、 P_m は隊列を維持する通信に成功している隊列数、 T_{platoon} は隊列維持時間、 T は測定時間である。隊列走行の維持は、20 msec ごとに隊列内全車両どうしでの情報交換の成否を基準とする。

図 13、図 14、図 15 に、隊列流入量を 120, 170, 250 platoon/h と変化させた際の提案方式と RR-ALOHA 方式の隊列維持率の時間推移を示す。隊列流入量が 120, 170 platoon/h の場合、RR-ALOHA 方式および提案方式は同程度の性能を示すが、RR-ALOHA 方式は、隊列流入量が 250 platoon/h（平均隊列間車頭距離 320 m 相当）のときに、隊列維持率が急激に低下するのに対し、提案方式ではすべての隊列流入量において同等の隊列維持率を示す。時間推移の平均を算出すると、隊列流入量が 250 platoon/h のときの提案方式の維持率 0.62 は RR-ALOHA 方式の維持率 0.54 に比して 14%高い。提案方式の車両 1 台あたりの受信情報量は 48 Kbps であり、RR-ALOHA 方式は 43 Kbps である。本シミュレーション条件では、隊列維持に最低限必要な受信情報量が 80 Kbps であることから、それに対して提案方式は 60%、RR-ALOHA 方式は 54%の情報受信量を示す。したがって、両手法が示す隊列維持率は通信性能の限界に近く、さらなる性能改善には隊列密度の制御方式や通信要件を改善する方式の検討が必要なため、本研

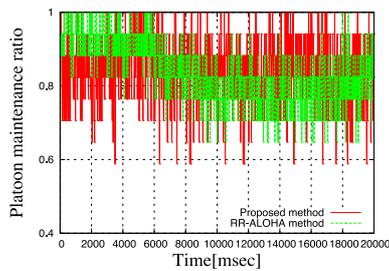


図 13 隊列維持率の時間推移 (流入量: 120 platoon/h)
 Fig. 13 Time alteration of platoon maintenance ratio (120 platoon/h).

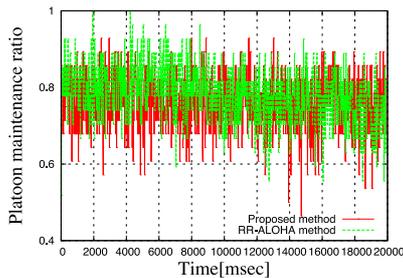


図 14 隊列維持率の時間推移 (流入量: 170 platoon/h)
 Fig. 14 Time alteration of platoon maintenance ratio (170 platoon/h).

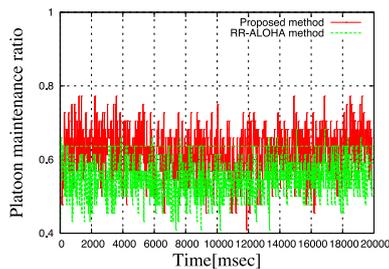


図 15 隊列維持率の時間推移 (流入量: 250 platoon/h)
 Fig. 15 Time alteration of platoon maintenance ratio (250 platoon/h).

究では検討の対象外とした。また、すべてのグラフにおいて、時間の推移にともなって激しいゆらぎを発生させている。図 16 に隊列流入量が 250 platoon/h の場合の提案方式と RR-ALOHA 方式の隊列維持時間率の累積度数分布を示す。RR-ALOHA 方式では 90%以上の隊列が隊列維持時間率 0.15 以上を示すのに対し、提案方式では 90%以上の隊列が隊列維持時間率 0.4 以上を示す。なお、RR-ALOHA 方式が示す分散は 0.35 であるのに対し、提案方式は 0.22 と小さい値を示しており、図 16 の結果とあわせて隊列ごとの維持率の偏りを低減させている。

VANET では一般にトポロジの変化が激しく、各車両が予約しているタイムスロット競合が多く発生する。その場合、次フレームで空スロットを再予約し、一時的に低下する情報伝達率を回復する。したがって、すれ違いが多く発生するような隊列の密度変化が局所的に激しい場合には、スロット競合が大きくなり、情報伝達率は激しいゆらぎを示

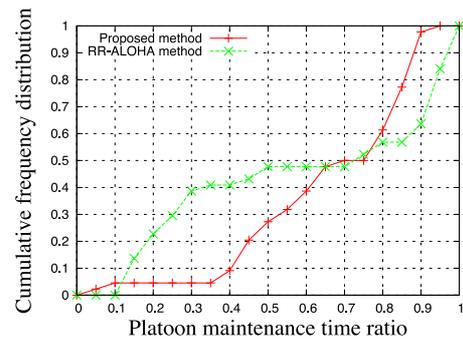


図 16 隊列維持時間率の累積度数分布 (流入量: 250 platoon/h)
 Fig. 16 Cumulative frequency distribution of platoon maintenance time ratio (250 platoon/h).

すと考えられる。また、特に複数のメンバ車両でスロットの競合が発生した場合、提案方式では代表車両がまとめてスロットを再予約することで、競合の起きた車両間での空スロットを効果的に割り当てることができ、高情報伝達率を示すと考えられる。時間推移の平均を比較すると、提案方式は隊列流入量が低いときには RR-ALOHA 方式とあまり変わらないが、隊列流入量が高いときには RR-ALOHA 方式に比べ高情報伝達率ならびに高隊列維持率を示す。また、隊列時間維持率の累積度数分布から、RR-ALOHA 方式ではすれ違いの発生によって、特定隊列の通信負荷が高くなり維持時間率が低下するのに対し、提案方式は特定隊列が高通信負荷時に周囲車両が通信負荷を低減させるので、特定隊列の維持時間率が極端に低下する現象を改善することが分かる。

5. おわりに

本論文ではまず、隊列走行時において、隊列の密度の高い環境下で、既存方式である単純連送方式では輻輳と隠れ端末に起因する通信負荷の偏りを引き起こすことを確認した。次いで、輻輳や隠れ端末問題の解決に有効である RR-ALOHA 方式を評価し、多少性能が改善されるが全体としては効果が少ないことを明らかにした。このため、本論文では CSMA 方式をベースに隊列走行用タイムスロット予約方式を提案し、タイムスロットの使用率を基に連送数を増減させるアルゴリズムを導入して、高い情報伝達率を維持しながら、輻輳と隠れ端末に起因する通信負荷の偏りを回避できることを示した。また、マスタ車両が他のメンバ車両分も代わりにスロット予約することで隊列内での予約競合を回避できることを示した。

さらに、高速道路上での現実に近い交通流の中で、単純連送方式ならびに RR-ALOHA 方式と比較検討シミュレーションした結果、提案方式は情報伝達率ならびに隊列維持率で優位性を示し、輻輳や隠れ端末問題の改善にも良好な結果を示した。今後、現実的な交通流を想定してゆらぎの詳細説明ならびに安定した隊列走行実現、車両間スロット

同期の精度が低下した際の性能検証に向けて引き続き検討を進める予定である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 (B) 課題番号 25280032 (2013 年) の助成により行われました。

参考文献

[1] Shladover, S.E.: Automated vehicles for highway operations (automated highway systems), *The Institution of Mechanical Engineers Part I of Systems and Control Engineering*, Vol.219, pp.53-75 (2005).

[2] Zhang, Y. and Cao, G.: V-PADA: Vehicle-Platoon-Aware Data Access in VANETs, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.60, No.5, pp.2326-2339 (2011).

[3] Onishi, R., Altintas, O., Shida, M. and Nemoto, Y.: An efficient bi-directional communication system for coordinated vehicle platooning, *ECTITS Workshop Collocated with IEEE Int. Conf. Intelligent Transportation System* (2010).

[4] New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO): エネルギー ITS 推進事業 (オンライン), 入手先 (<http://www.nedo.go.jp/content/100079701.pdf>) (参照 2012-09-12).

[5] Tsugawa, S., Kato, S. and Aoki, K.: An automated truck platoon for energy saving, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.4109-4114 (2011).

[6] Eichler, S.: Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard, *Vehicular Technology Conference Fall*, pp.2199-2203 (2007).

[7] Tobagi, F. and Kleinrock, L.: Packet switching in radio channels: Part 2 - The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution, *IEEE Trans. Communications*, Vol.23, No.12, pp.1417-1433 (1975).

[8] 関 馨, 浜口雅春: 隊列走行のための車車間通信 (第 2 報), 情報処理学会研究報告, Vol.2010-ITS-43, No.5, pp.1-8 (2010).

[9] Lu, N., Ji, Y., Liu, F. and Wang, X.: A Dedicated Multi-Channel MAC Protocol Design for VANET with Adaptive Broadcasting, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp.1-6 (2010).

[10] Borgonovo, F., Capone, A., Cesana, M. and Fratta, L.: RR-ALOHA, a reliable R-ALOHA broadcast channel for ad-hoc inter-vehicle communication networks, *Proc. Med-Hoc-Net* (2002).

[11] Borgonovo, F., Capone, A., Cesana, M. and Fratta, L.: ADHOC MAC: A new MAC architecture for ad hoc networks providing efficient and reliable point-to-point and broadcast services, *ACM Wireless Networks*, Vol.10, pp.359-366 (2004).

[12] Kim, Y.-A. and Nakagawa, M.: R-ALOHA protocol for SS inter-vehicle communication network using head spacing information, *Proc. 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.278-283 (1996).

[13] Scopigno, R. and Cozzetti, H.A.: Mobile Slotted Aloha for Vanets, *Vehicular Technology Conference Fall*, pp.1-5 (2012).

[14] 牧戸知史, 鈴木徳祥, 原田知育, 村松潤哉: 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.2257-2265 (2007).

[15] 原田知育, 鈴木徳祥, 牧戸知史, 伊藤修朗, 林 宏明, 寺田重雄: 自律分散型 TDMA 車車間通信システムの開発, 情報処理学会研究報告, Vol.2007-MBL-43, No.116,

pp.129-136 (2007).

[16] 鈴木理基, 徳田大誠, 重野 寛: 隊列走行アプリケーションにおける TDMA 通信方式の検討, 情報処理学会研究報告, Vol.2012-ITS-48, No.6, pp.1-8 (2012).

[17] 大和田泰伯, 前野 誉, 金田 茂, 久永良介, 高井峰生: Scenargie を用いた ITS シミュレーション, *IPSSJ DICOMO*, No.14, pp.233-234 (2008).

[18] 吉村 忍, 西川紘史, 守安 智: 知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発, 日本シミュレーション学会, Vol.23, No.3, pp.228-237 (2004).

[19] 財団法人日本自動車研究所: 平成 22 年度 ITS 通信シミュレーション評価シナリオ (Ver.1.0) (オンライン), 入手先 (http://www.jari.jp/research-project/research-department/its/H23_simyu/) (参照 2012-09-12).



鈴木 理基 (学生会員)

1982 年生。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。2008~2010 年株式会社野村総合研究所在籍。2010 年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士後期課程入学。

現在, 同課程在学中。ITS の研究に従事。IEEE 学生会員。



徳田 大誠

1988 年生。2011 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2013 年同大学大学院博士前期課程修了。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ヤレス通信研究会運営委員等を歴任。現在, 情報処理学会高度交通システム研究会幹事, 電子情報通信学会英文論文誌 B 編集委員, 同ネットワークシステム研究専門委員会委員。Vice Chair of IEEE ComSoc Asia Pacific Board Technical Affair Committee。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。