

マルチレスポンス通信を用いた 隊列走行車両管理通信手法

神 田 翔 平^{†1} 鈴 木 理 基^{†1}
原 田 亮^{†1} 重 野 寛^{†1}

複数車両が短い車間距離を保ち、高密度に走行し、燃費消費効率、道路容量を向上することを目的とした協調隊列自動走行に関する研究がされている。要素技術である従来の One-Request/One-Response 型車車間通信では、隊列内車両台数の増加と共に通信量が増加し、効率が悪い。そこで、本稿では一台が送信したリクエストに対し隊列内全車両がレスポンスを返信する、One-Request/Multi-Response 通信を提案する。提案手法は、隊列フィルタを用い隊列内車両を判断し隊列内マルチキャストを実現する。これにより通信回数を減らす。提案手法の性能を計算機シミュレーションにより評価する。リクエストレスポンス通信完了までの時間、要求時間内でのリクエストレスポンス通信達成率、データ量において本提案が有効であることを示す。

A Platoon Management Method Using Multi-Response Communication

SHOHEI KANDA,^{†1} MASAKI SUZUKI,^{†1}
RYO HARADA^{†1} and HIROSHI SHIGENO^{†1}

In order to realize energy-efficiency and enhance capacity of roads, the studies about automatic driving cooperative platooning is proceeding. Platooning vehicles drive with keeping short inter-vehicular distance and are applied One-Request/One-Response vehicular communication to work platooning system. However the communication is not efficient. This is because the more number of platoon vehicles are increased, the more traffic load are generated. In this paper, we propose One-Request/Multi-Response vehicular communication. In this method, vehicles use inter-platoon multicast and all platoon member vehicles response to request of a vehicle. This scheme reduce number of communication and make communication efficient. We evaluate performance of proposed method and show efficiency in terms of delay of Request/Response, success ratio of Request/Response within required time and data load.

1. はじめに

高速道路における道路混雑や燃料の浪費などの交通上に存在する問題を改善するシステムの一つとして協調的隊列自動走行が研究されている¹⁾。隊列走行は、複数の車両が短い車間距離を保ち、高密度な車群を形成しながら走行する技術であり、車間距離を短く保つことで空気抵抗によるエネルギー消費を低減し、交通量を増やすことが期待される。隊列を維持するために車車間通信は、必須の技術とされている。隊列を組む車両同士の車間距離維持のために、先行車両のアクセル・ブレーキ情報などの車両動作を制御する情報を後続車両へ伝播しなければならない。また、隊列形成や隊列への途中参加、隊列同士の合流等の要求/許可によって隊列メンバを管理する情報の交換が必要である。本稿では前者を隊列走行制御通信、後者を隊列管理通信と呼ぶ。隊列管理通信に着目すると、既存手法では、ユニキャストを繰り返すことで、車両間で合意を形成している。従って、車両台数の増加に伴って通信トラフィックが増加し、合意形成までの時間も長くなってしまう。さらに、パケット衝突が頻繁に発生する状況下で、合意形成までの時間が長くなってしまう。

本稿では隊列フィルタを用い、隊列メンバへの1つのリクエストに対しマルチレスポンスを得る隊列内マルチキャストを提案し、課題を解決する。提案手法は隊列内メンバをビット配列により一意に識別する隊列フィルタ^{2),3)}を拡張し、それを利用することにより隊列を構成するメンバを自律的に判断することを可能とする。また、隊列内でマルチキャストによる通信を行うことで余剰パケットの発生を抑制する。さらに、パケットロスが発生した場合は協調再送することで通信性能を改善する。

コンピュータシミュレーションにより、隊列内密度を変えた場合の合意形成までの時間、成功率、発生データ量の観点から提案手法の有効性を示す。

以下、2章では、本稿で想定する隊列走行および既存手法での問題点を述べ、3章では、隊列走行におけるマルチレスポンスを実現するための通信手法を提案する。4章で提案方式をコンピュータシミュレーションにより定量評価する。5章で今後の課題を述べ、6章で結論を述べる。

^{†1} 慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境化学専攻
Graduate School of Science and Technology, Keio University

単独走行フェーズ	隊列形成フェーズ	隊列維持フェーズ	隊列分岐フェーズ
			
- 隊列対象車両はそれぞれ単独で走行 - 隊列車両と集合場所を決定し、集合	集合した車両と隊列を形成	- 隊列走行を維持 - 隊列自動走行制御	- 隊列を解消 - 単独走行フェーズへ移行
センターを介した広域通信により隊列車両の位置情報・集合情報を交換	- 広域通信から狭域通信(RC005)へ切替 - 狭域通信により円滑な隊列形成を支援	狭域通信により車両制御情報を伝搬	- 狭域通信により円滑な隊列分岐を支援 - 狭域通信から広域通信へ切替

図 1 隊列走行シナリオ

2. 隊列走行システム

2.1 協調隊列走行

本稿における協調隊列自動走行システムは高速道路での実現を想定している。大型車の高速走行ではエネルギー消費の4割以上が空気抵抗であり、複数の車両が隊列を組んで車間距離を詰めて走行することにより、空気抵抗を大幅に低減させることが可能である⁴⁾。また、高速道路は信号や交差点がなく、料金所やサービスエリアがない限り周辺車両の変化は少なく一般道路と比較して安定した隊列形成、走行が可能となる。これらのことから高速道路は協調隊列走行の実現性が高い環境であるといえる。

2.2 想定環境

高速道路では一般車両用レーンの他に、隊列走行する車両は隊列走行用の指定レーンを走行するものとする。各車両はGPSを用いて定期的に自身の位置を知ることができ、アドホックネットワークを構築可能な無線機を搭載しているものとする。隊列を形成するメンバは、既知である場合を想定し、隊列を形成する車両は先頭を走行するマスタ車両と追従するメンバ車両からなる。マスタ車両はメンバ車両の情報を把握、管理する。メンバ車両は、マスタ車両の通信範囲内を走行し、前後車両との車間距離を制御しながら自動走行する。

上記想定のもと、隊列走行運動を4つのフェーズに分類する。図1に詳細を示す。隊列を組むメンバはそれぞれ独立に高速道路へ合流する。単独走行フェーズは、メンバ車両が一般道路から高速道路へ合流した状態である。メンバ車両は隊列を形成するために、広域通信網を利用して集合する。隊列形成フェーズは、メンバ車両が互いの狭域通信範囲内を走行する状態である。メンバ車両は車車間通信を用いて隊列の形成を要求し、マスタ車両と他のメンバ車両からの許可を得て隊列を形成する。隊列維持フェーズは、隊列を形成して走行する

	A. 隊列走行制御通信		B. 隊列管理通信
	走行制御通信	隊列情報通信	
			
目的	自動走行制御 位置情報/加減速度情報/ 車間距離制御情報		隊列運行管理 隊列合流要求/許可情報/ 操舵手動/自動切替情報
通信タイプ	隊列内車両へ情報散布 アドバタイズ型		隊列内全車両での要求/合意 リクエスト/レスポンス型
通信周期	定期的		通信要求発生時 (ドライバからの入力により発生)
通信方式	Multicast		Multicast/Unicast
通信要件	低遅延通信 高信頼性通信		高信頼性通信

図 2 隊列走行通信

状態である。隊列内の全車両は定期的な車車間通信により、各車両の位置情報、通信状態を交換する。隊列分岐フェーズは、メンバ車両が隊列から離脱する状態である。隊列走行中の車両は離脱車両との通信を切断し、離脱車両情報を隊列内車両情報から削除する。

2.3 隊列走行制御通信と隊列管理通信

車車間通信で扱う情報は隊列走行制御情報と、隊列管理情報である。隊列走行に必要な情報について、通信方式、通信特性、通信タイプを検討した結果、隊列走行通信における車車間通信は隊列走行制御通信と隊列管理通信の2つである。図2にそれぞれの特徴を示す。

- 隊列走行制御通信: 隊列走行制御通信は、隊列自動走行を行うための位置情報、加減速情報などを扱う。そのため、高い信頼性が求められる。また、20msec ほどの周期的な情報更新が必須となっている^{5), 6)}。
- 隊列管理通信: 隊列に所属するメンバの管理を目的とし、隊列維持/形成のための情報、合流/離脱に関する情報などを扱う。そのため、高い信頼性が求められる。通信方式はリクエストレスポンス型の通信であり、必要に応じて発生する。

2.4 既存手法の課題

車両毎のリクエストレスポンス通信

既存手法である、車両毎のリクエストレスポンス通信では隊列内車両台数の増加と共に双方向に通信が発生し、トラフィックが増加する。また、リクエストパケットやレスポンスパケットが損失した場合、リクエストパケット送信車両はレスポンスを一定時間待ち、タイムアウトで検知する。従って、タイムアウトを待つ間、シーケンシャルなユニキャストを中断するので、キックバック時間が長くなる。

隊列 ID の割当手法

上記課題を解決するには、マルチキャストを利用する方法がある。パケットを隊列内マルチキャストにより伝送するには、隊列内の車両を隊列 ID により識別する必要がある。隊列 ID は一意でなければならないが、特定の車両が集中管理するのは、分散的な車車間ネットワークの管理手法として適していない。また、実際の交通状況として、隊列は多数存在し、隊列同士の合併や隊列への車両の合流/離脱など動的な隊列運動に伴い、隊列内メンバは頻繁に変化することも考えられる。そのため、隊列内メンバが変化する度に、隊列 ID も新たに割当てての必要があり、動的な隊列 ID 割当が必要となる。しかし、既存手法では静的な隊列 ID 割当手法が検討されている⁷⁾。

3. 隊列内合意形成のためのマルチキャスト通信

本稿では、リクエストレスポンス通信において一台が送信したひとつのリクエストパケットに対し隊列内全車両がレスポンスパケットを返信する、One-Request/Multi-Response 型通信を提案する。

3.1 提案手法

本提案は隊列フィルタを拡張して、隊列内マルチキャスト、隊列内パケット損失検知、隊列内パケット再送の機能を実現する。隊列フィルタは隊列を一意に識別するビット配列である。車両は拡張した隊列フィルタを動的に管理し、隊列の ID、メンバ車両の識別に利用する。隊列内マルチキャストは、パケット受信車両が隊列内車両であるか自律的に判断し、隊列内車両を宛先にマルチキャストする。隊列内パケット損失検知は、隊列内車両がリクエストに対するレスポンスを送信したか判定し、パケット損失を検知する。隊列内パケット再送は、パケット損失を検知した車両が、損失車両へのリクエストパケットを再送する。

3.2 隊列フィルタ

各車両は隊列フィルタを利用して、隊列を一意に識別し、自車両や送信車両が隊列に含まれるか自律的に判断する。従来の隊列フィルタは、各車両が固定長の bloom filter を保持、共有することで、メンバ車両の情報を空間効率よく管理する。本稿では、隊列を構成する各車両は除算可能な counting filter⁸⁾ を保持し、送信時に、counting filter をもとに作成した固定長の bloom filter をパケットヘッダに挿入する。従来の機能に加え、パケット受信時に、パケット内の隊列フィルタと、自車が保持する隊列フィルタを比較することで、パケットの宛先に自車両が含まれているか判定する。さらに、他のメンバ車両からのレスポンスをオーバーヒアすることでパケットの損失車両を検知する。

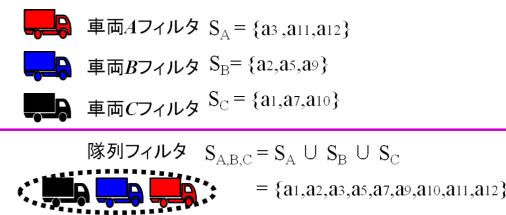


図 3 隊列フィルタ登録

隊列走行時は道路上で車両が高密度となり、トラフィック量が膨大となるが、提案手法は少ない情報量で隊列管理を行うので、トラフィック量低下の効果が期待できる。また、集中管理ではなく、分散的に隊列フィルタを作成するので、車両ネットワークに適している。

隊列フィルタ作成

bloom filter を用いた隊列フィルタの作成手順について述べる。

- (1) マスタ車両は自車両のハッシュ値を登録したフィルタをブロードキャストする
- (2) マスタが送信したパケットを受信した各メンバ車両は受信したフィルタをヘッダに挿入し、自車両のハッシュ値をブロードキャストする。ただし、各メンバ車両は自車両が参加する隊列のマスタ車両のハッシュ値を事前に知っているものとする
- (3) 車両はメンバから受信したパケット内の各車両のハッシュ値をフィルタに登録する

図 3 に隊列内情報を登録する動作を示す。各隊列内車両は自車両のハッシュ値を登録したフィルタを保持する。本稿では、これを車両フィルタと呼ぶ。隊列内の全ての車両の車両フィルタを OR 演算したものが隊列フィルタとなる。隊列フィルタは隊列を構成する車両の情報を基に作成される為、各隊列ごとで一意である。

各隊列内情報の登録、削除は、OR 演算と AND 演算により実現する。従って、隊列同士が合併する際にも簡単な演算により、隊列フィルタを作成できるので、車両の隊列への合流/分離や隊列同士の合併/分割などが頻繁に発生する状況に対応できる^{2),3)}。

3.3 隊列内マルチキャスト

パケット送信時、隊列フィルタをパケットのヘッダに挿入し、ブロードキャストする。パケット受信車両はヘッダに挿入されている隊列フィルタに自車両が含まれているか確認する。

図 4 に具体例を示す。受信したパケットの宛先である隊列フィルタ ($S_{platoon}$) に自車両が含まれているか判断する。パケットを受信した車両 B,D は自車両のハッシュ値が登録されているフィルタ (S_B, S_D) と隊列フィルタ ($S_{platoon}$) を AND 演算する。AND 値が自車両

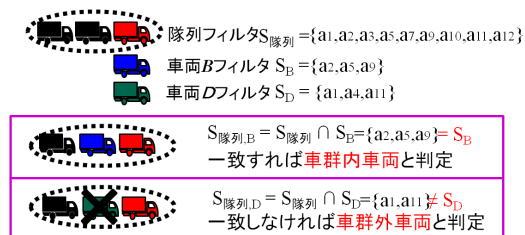


図 4 隊列内車両識別

のハッシュ値が登録されているフィルタ (S_B) と一致する場合は、自車両は隊列内車両であると判定し、パケットを受信する。一方、AND 値が一致しない場合は、自車両は隊列車両でないと判定し、パケットを破棄する。

3.4 隊列内パケット損失検知

リクエストパケットを受信した隊列内車両は、隊列内マルチキャストにより、レスポンスパケットを送信する。この時、隊列内車両同士のパケット衝突を防ぐため、各車両はランダムな待ち時間を設け、送信するタイミングを隊列内でずらす。隊列内車両は他車両が送信したレスポンスパケットを受信し、ヘッダに挿入された自車両フィルタを利用して他車両の送信状態を確認する。そして、レスポンスパケットを送信していない隊列内車両を特定し、パケット損失を検知する。

図5に損失検知の例を示す。各車両はリクエストパケットを受信した後、他のメンバー車両のレスポンスパケットを受信する度に、レスポンスパケットに含まれている送信元フィルタと、リクエストパケットに挿入されていた宛先フィルタ（隊列フィルタ）の NAND 演算を行う。NAND 演算の結果、一つも要素が登録されておらず、ビット全てが“0”（empty）である場合には、リクエストパケットに対する全てのレスポンスパケットを受信したとする。しかし、一つでも要素が含まれている場合には、再送フェーズへと移行する。以上の処理で、送信したリクエストパケットに対し、隊列内車両全てからのレスポンスパケットを受信したか判断する。

また、既存手法ではパケット損失に関して、リクエストパケット送信車両がパケット損失を検知する。提案手法では、リクエスト/レスポンスパケットを隊列内マルチキャストし、また、隊列内車両は隊列フィルタを用いそれらのパケットの受信状態を把握することにより、リクエスト送信車両のみならず、隊列内全車両でパケット損失を検知する。

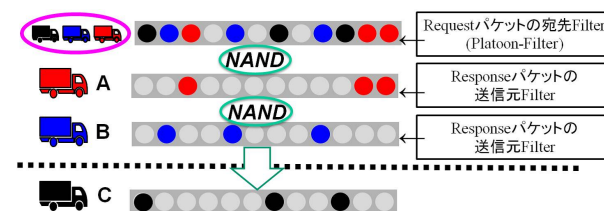


図 5 パケット損失検知手法

3.5 隊列内パケット協調再送

リクエストパケットの再送は、隊列内でパケットを受信した任意の車両が行う。隊列内車両はリクエストパケット受信後にランダムな待ち時間を設け、タイムアウトした車両がリクエストパケットを再送する。リクエストパケットの再送を送信車両に限らず他車両が行い、直近に利用したものとは異なる伝送路を用いることで、通信信頼性の向上をはかる。

リクエストパケットの再送時には、NAND 計算後のフィルタをパケットヘッダに挿入し、送信する。受信した隊列内車両は、受信した再送リクエストパケットに挿入された NAND フィルタと自車両の持つ NAND フィルタを比較する。一致した場合には、リクエストパケットを再送しないことで、冗長にリクエストパケットを再送する車両の増加を防ぐ。再送リクエストパケットに挿入された NAND フィルタが車両フィルタと一致した場合は、自車両がパケットを損失したと判断し、レスポンスパケットを送信する。

パケット損失車両が複数存在する場合においても、隊列フィルタを用いることで、複数のパケット損失車両へリクエストパケットを一括で再送することが可能となる。従って、既存手法と比べリクエストパケット再送の際の通信回数を抑制する。

レスポンスパケットの再送時、隊列内でのパケット衝突を防ぐために各車両でランダムな待ち時間を設け、送信時間をずらす。リクエストパケットを再送しても、要求時間内に隊列内全車両からのレスポンスパケットを受信しなければ、リクエスト失敗とする。

パケット送信時の待ち時間

隊列内車両はリクエストパケット受信時に再送までのタイムアウト時間である再送タイマーを起動し、協調再送時に車両間でパケットの衝突が起きないようにする。また、各車両はレスポンスパケット送信時にランダムな応答遅延時間を設け、車両間でパケットの衝突が起きないようにする。

図6に車両Sと車両A,B,C間でのリクエストレスポンス通信の様子を示す。再送タイ

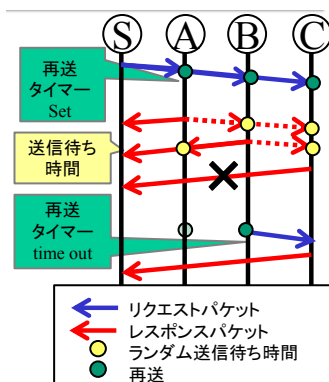


図 6 パケット送信時の待ち時間

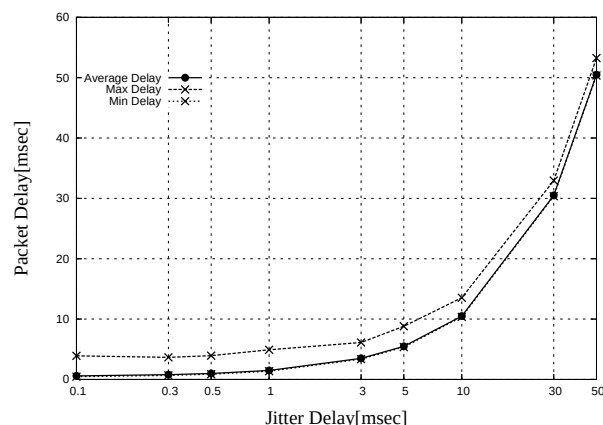


図 7 ランダム待ち時間によるパケット伝送遅延

マーは最初にタイムアウトした車両のみが再送することで、パケット隊列内車両からのリクエストパケットの冗長な送信を抑制する。ランダムな応答遅延時間はレスポンスパケットを同時に送信することによるパケット衝突を防ぐ。

それぞれの待ち時間は NAND フィルタに登録されている要素数、すなわちハッシュ値の個数に比例するように設定する。式 1 は待ち時間 ($WaitingTime$) の設定に利用する式を示す。

表 1 シミュレーション条件		
道路モデル	道路長	10.00km
	車線数	6 車線 (片側 3 車線)
	隊列走行用レーン	1 レーン
	一般車両用レーン	2 レーン
	車線幅員	5.4m
隊列車両走行モデル	中央帯幅員	4.5m
	隊列内車両台数	(3,4,5,6,7,8,9,10) 台/隊列
	隊列車両間距離	4 m
プロトコルモデル	最大隊列密度	19platoon/lane
	通信規格	802.11p
	周波数	5.885~5.895MHz
	変調方式	OFDM(QPSK1/2)
	伝送速度	3~27Mbps
	帯域幅	10MHz
	送信出力	20dbm
	アンテナ指向性	無指向性
	MAC 層方式	CSMA/CA
隊列車両通信トラフィック	制御パケットサイズ	50byte
	制御パケット送信周期	20msec
	制御パケット連送数	送信周期内 5 連送
	管理パケットサイズ	50byte
	管理パケット発生頻度	random

$$WaitingTime = Elements \cdot Random \cdot T \quad (1)$$

$Elements$ はハッシュ値の個数、 $Random$ はランダム値を、 T は定数であり、再送タイマーの場合は T_A を、ランダムな応答時間の場合は T_B を利用する。再送タイマーは値が小さいと、隊列内他車両の再送パケットを受信する前に再送してしまい、隊列内の複数車両が再送パケットを送信してしまう。従って十分に大きい値を設定する。一方、ランダムな応答遅延時間についても検討が必要である。図 7 はランダム待ち時間に対するパケット伝送遅延を示す。ランダムな応答遅延時間の値が大きいと、パケット伝送遅延の原因となる。従って十分に小さい値を設定する必要がある。

4. 評価

本稿では、提案手法をコンピュータシミュレーションにより評価する。

4.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件を表 1 に示す。シミュレータにはネットワークシミュレータ Scenargie version 1.3⁹⁾ と交通流シミュレータ MATES(ADVENTURE.Mates Version 0.11

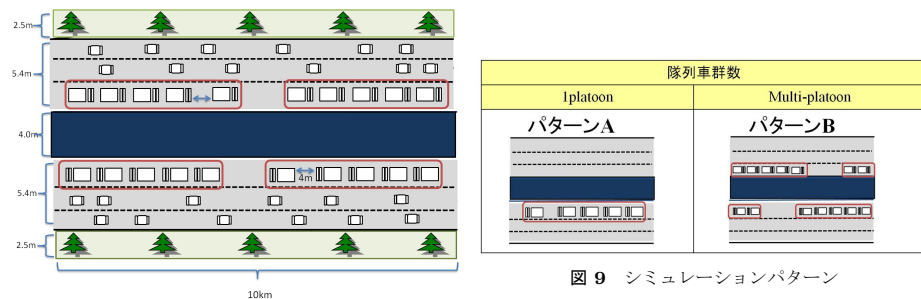


図 8 シミュレーション道路モデル

beta)¹⁰⁾を使用した。道路モデルは図 8 のように定義した。直線道路の距離は通信の影響を測定するのに充分である 10.00km に設定した。直線道路は高速道路を想定し、非隊列車両が走行する非隊列レーンと、隊列を形成した車両が隊列走行を行う隊列走行レーンから構成される。片側三車線のうち、非隊列レーンが二車線、隊列走行レーンが一車線とする。但し、道路を走行する車両は隊列を形成するトラック車両のみとした。車両は直線道路の端点から流入し、平均速度 80km/h で道路 10km を走行した後、反対側の端点から流出する。

隊列車両は隊列走行制御通信と隊列管理通信を行うものとした。隊列走行制御通信は 50Byte の隊列走行制御情報を 20msec 周期で隊列内マルチキャストする。また、通信の信頼性を向上させるため、パケットを複製し、周期内に 5 連送する。隊列管理通信は 50Byte の隊列管理情報を通信する。間隔を最小 100msec、最大 1000msec の範囲でランダムに通信を発生させた。再送タイマーとランダムな応答時間の最大値はそれぞれフィルタの要素数あたり 5msec、0.5msec とした。

隊列数と非隊列車両の有無により、図 9 に示す 2 つのシミュレーションパターンについて評価した。パターン A では、隊列は 1 つのみ存在する。パターン B では、隊列は同時に複数存在する。尚、隊列の発生頻度や隊列間の距離、車両間隔などの動作は全て交通流シミュレータに基づく。

4.2 比較対象および評価項目

比較対象は既存方式である車両毎のリクエストレスポンス通信とした。本稿では、キックバック時間とコミットメント成功率と発生データ量を評価した。キックバック時間は、リクエストパケットを送信してから、隊列内全車両からのレスポンスパケットを受信するまでにかかった平均時間を示す。コミットメント成功率は、全リクエストパケット送信数とコミッ

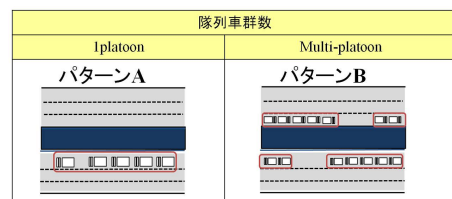


図 9 シミュレーションパターン

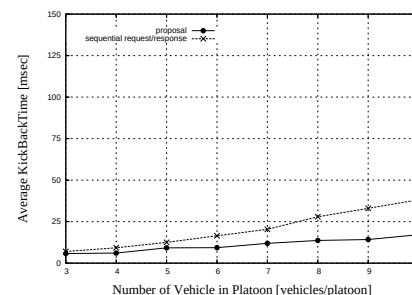


図 10 隊列間干渉が無い場合
のキックバック時間 (パターン A)

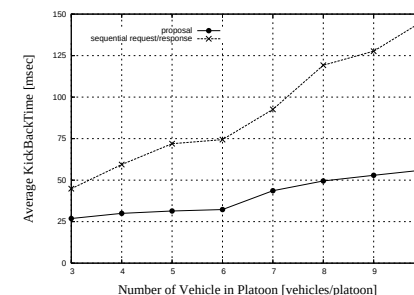


図 11 隊列間干渉が存在する場合
のキックバック時間 (パターン B)

トメント成功数の比率を示す。コミットメント成功とは、リクエストパケットを送信してから要求時間内 100msec に隊列内全車両からのレスポンスパケットを受信できた状態である。ただし、要求時間を過ぎてからパケットを受信した場合はコミットメント失敗とする。発生データ量は単位時間당りに送信されたリクエスト・レスポンスパケットのデータ量を示す。再送制御により再送されたパケットも含む。

4.3 隊列内車両台数と隊列間干渉が与える影響

図 10 に隊列間干渉が無い場合 (パターン A) における、隊列内車両台数を変化させたときの平均キックバック時間を示す。パターン A では、隊列内車両台数の増加に伴って、提案手法は既存手法に比べ小さいキックバック時間を示し、最大で約 50 %改善している。既存手法では隊列内車両台数が 1 台増加するにつれ、コミットメントプロセスあたり通信回数が 1 回増加するが、提案手法ではマルチキャストによる一括送信を行っているため、キックバック時間が隊列内車両台数増加の影響を受けにくい。

図 12 に隊列間干渉が無い場合 (パターン A) における、隊列内車両台数を変化させたときの平均キックバック時間を示す。隊列内車両台数の増加に関わらず、提案手法、既存手法ともにコミットメント成功率はほぼ 100 %である。これは両手法ともパケット損失が起きた際にも再送制御によるリクエストパケット再送が行われ、要求時間内にコミットメントが成立したことを示している。

図 14 に隊列間干渉が無い場合 (パターン A) における、隊列内車両台数を変化させたときの平均キックバック時間を示す。発生データ量は、隊列内車両台数が増加数につれ、提案手法、既存手法ともに増加している。これは、両手法とも隊列内車両台数が増加したこと

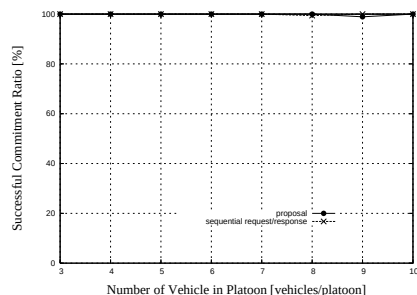


図 12 隊列間干渉が無い場合
のコミットメント成功率 (パターン A)

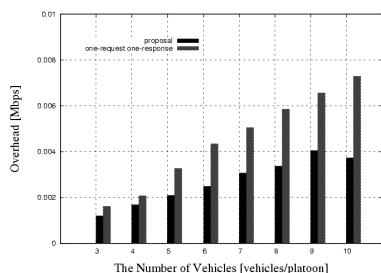


図 14 隊列間干渉が無い場合
の発生データ量 (パターン A)

により、リクエストレスポンス型通信に必要なパケット数が増加したことを示している。しかし、両者を比べた際に、提案手法は既存手法より最大 53.0%の発生データ量削減を実現している。これは、後者が一台ずつパケット交換を行っているのに対し、前者がマルチキャストを用いて隊列内複数車両と一括でパケット交換を行えるからである。つまり、提案手法では隊列内車両台数増加の影響を受けにくい。

図 11 に隊列間干渉が存在する場合 (パターン B) における、隊列内車両台数を変化させたときの平均キックバック時間を示す。パターン B では、隊列内車両台数の増加に伴って、提案手法は既存手法に比べ小さいキックバック時間を示し、最大で約 40 %改善している。隊列内車両台数が増加すると車両密度が増加する。それに伴って隊列車両が送信するパケット量が増加し、帯域圧迫による、隊列内や隊列間のパケット衝突が発生しやすくなる。提案手法はパケット損失回数がキックバック時間へ与える影響を低減している。

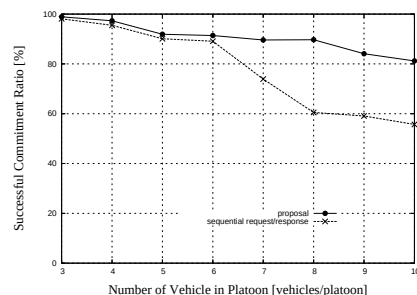


図 13 隊列間干渉が存在する場合
のコミットメント成功率 (パターン B)

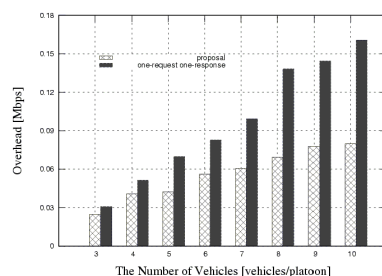


図 15 隊列間干渉が存在する場合
の発生データ量 (パターン B)

図 13 に隊列間干渉が存在する場合 (パターン B) における、隊列内車両台数を変化させたときのコミットメント成功率を示す。隊列内車両台数の増加に伴い、提案手法、既存手法ともにコミットメント成功率が低下している。既存手法では隊列内車両 7 台以降のキックバック時間が要求時間を超えたため、コミットメント成功率は大きく減少する。隊列内車両台数が 10 台のときには 100msec 内にコミットメントが成功した割合は 55.7%を示す。一方、提案手法は隊列内車両台数増加による通信回数増加の影響を受けにくく、また、パケット損失が発生した際でもリクエストパケット再送が効率よく行われるためキックバック時間が要求時間内に抑えられ、コミットメント成功率の低下を抑えた。隊列内車両台数が 10 台のときでもコミットメント成功率は 81.2%を示す。

図 15 に隊列間干渉が存在する場合 (パターン B) における、発生データ量を示す。発生データ量は隊列内車両台数が増加数につれ、提案手法、既存手法ともに増加しているが、提案手法は既存手法と比較し、最大 50.3%の発生データ量削減を実現している。これはパターン A で述べたように、提案手法がリクエストパケットの一括送信を行っていることに加え、隊列間干渉によるパケット損失における再送制御においても提案手法は多数車両にリクエスト再送を一括で行うことが可能であるためである。このように、提案手法ではリクエストパケット送信、再送の一括送信を行うことによりパケット衝突が頻発する状況下において発生データ量を抑制した。

以上より、提案手法はリクエストパケットの協調再送により、隊列間でのパケット衝突が頻発する状況下でも、キックバック時間の増加とコミットメント成功率の低下を抑制した。

5. 今後の課題

本稿では隊列内車両台数を変化させて評価を行った。しかし、現実では非隊列車両の影響や高速道路に存在する隊列の数が通信に影響を与えることが考えられる。今後の課題として、非隊列車両密度や隊列密度をパラメータとして評価を行う。

6. おわりに

高速道路上で複数のトラックが短い車間距離を保ちながら高密度に走行し、燃費消費効率、道路容量を向上することを目的とした協調隊列自動走行に関する研究が行われている。隊列を維持するために車車間通信は、必須の技術とされている。既存の車車間通信により隊列走行を実現するためにはユニキャストを用いている。しかし、ユニキャストで車両毎に実行するリクエストレスポンス通信では、隊列内車両台数の増加と共に双方向に通信が発生

し、トラフィックが増大する。また、一台でもリクエストパケットやレスポンスパケットが損失した場合、送信車両はレスポンスを待ち続けてしまう。

本稿では、一台が送信したひとつのリクエストに対し隊列内全車両がレスポンスを返信する、One-Request/Multi-Response 通信を提案した。bloom filter を用いることで隊列を一意に識別し、リクエストパケット/レスポンスパケットを隊列内マルチキャストで送信し、パケットの受信・送信状態を隊列内で共有することにより、通信の回数を減らした。また、ある車両がレスポンスを損失したことを隊列内の他車両が検知する。そして、パケット損失の際にパケットリクエスト送信車両ではなく、隊列内の他車両がリクエストパケットの再送を行うことで、よりパケットを伝達しやすい車両による再送を実現した。

計算機シミュレーションによる評価を行った結果、既存手法と比較し、リクエストレスポンス通信完了までの平均時間を約 47%短縮し、要求時間内でのリクエストレスポンス通信達成率を常 80%以上に維持し、さらに発生データ量を 50%減少させた。以上より、本提案が非隊列車両の通信による帯域圧迫や、隊列間の通信の干渉が起りやすい環境下で有効であることを示した。

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*, pp.53-75 (2005).
- 2) 内川亜美, 羽鳥遼平, 黒木智也, 重野 寛: 隊列走行のための動的な隊列管理手法の提案, 第 37 回 I T S 研究会, Vol.67, pp.1-6 (2009).
- 3) Uchikawa, A., Hatori, R., Kuroki, T., Shigeno, H. : Filter Multicast : A Dynamic Platooning Management Method, 2nd IEEE Intelligent Vehicular Communications System Workshop (IVCS ' 10) (2010).
- 4) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構: エネルギー ITS 推進事業, <http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p08018.html> (2011).
- 5) 関 馨, 浜口雅春: 隊列走行のための車車間通信 (第 2 報), 第 43 回 I T S 研究会, pp.1-8 (2009).
- 6) Nakaoka, K.: A Feasibility Study on Inter-Vehicle Communication Systems for Practical Use in Urban Area based on Multi-Vehicle Experiment., *IEICE Transaction. Fundamentals of Electronics*, pp.689-699 (2010).
- 7) Onishi, R.: An Efficient Bi-Directional Communication and Naming System for Co-operative Vehicle Platooning, *ECTITS Workshop co-located with IEEE Int. Conf. Intelligent Transportation System* (2010).
- 8) Fan, L., Cao, P., Almeida, J. and Broder, A.: Summary cache: a scalable wide-area Web cache sharing protocol, *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, Vol.8, No.3, pp.281-293 (2000).
- 9) 大和田泰伯, 前野 誉, 金田 茂, 久永良介, 高井峰生: S c e n a r g i e を用いた I T S シミュレーション, 情報処理学会シンポジウム論文集, 2008(14), pp.233-234 (2008).
- 10) 吉村 忍, 西川鉦史, 守安 智: 知的マルチエージェント交通シミュレータ MATES の開発, 日本シミュレーション学会大会発表論文集 Vol.23-No.3, pp.228-237 (2004).