

VANETにおける複数無線チャネルを用いた 大容量データ配信手法の提案

稲葉 健吾¹ 孫 為華² 柴田 直樹¹ 伊藤 実¹

概要：車車間通信を利用したデータ配信についての研究が盛んに行われている。しかしながら、パケット衝突によるスループットの低下および対向車との通信が困難という技術的課題が残されている。本研究では、VANET（Vehicular Ad-hoc NETwork）における複数無線チャネルを用いたデータ配信手法を提案する。提案手法では、道路を無線電波の到達距離ごとの領域（以後、セルと呼ぶ）に分け、互いに干渉しない複数のチャネルを各セルに順番に割り当てる。複数のチャネルを同時に並行して使用するために、各車両は所属するセルのチャネルを使用して通信することで、パケットの衝突を軽減し、スループットの改善を図る。また、各車両はGPSによる精密な時刻同期の下で、送信待機期間に基づく長さのビーコンを送信し、最も長いビーコンを送信したノードに対して一定期間の送信権を与える。これにより、連続したメッセージの送受信を可能にし、大容量データの配信を実現する。シミュレーションによる従来手法との比較の結果、提案手法は車両密度が高い混雑した状況においても高いスループット性能を発揮できることを確認した。その要因として提案手法による帯域へのアクセス制御方式が効果的に機能したと考えられる。

1. 序論

近年、交通事故や渋滞などの道路交通問題を解消するために用いられる技術として車車間通信が関心を集めている。車車間通信を用いたシステムを効果的に利用するためには、無線通信機能を備えた車載器の普及が大きな課題である。一方で、民間の通信事業者が運用・事業展開する携帯電話網やWiMAXを利用することで、車両からのインターネットアクセスが可能である。通信カーナビなどのテレマティクスサービスや高精度・高鮮度の道路交通情報を収集するプローブカーの普及につれて、無線通信機能を備えた車載器の利用ニーズは高まるものと考えられている。今後は利便性や娯楽性のさらなる向上として、カーナビ内の地図情報の更新や音楽・動画のダウンロードなどの大容量通信が必須となるサービス実現が期待されている。しかしながら、これらのサービスはインフラの整備が不十分な場所では利用が制限され、継続的な利用が困難であるとともに、携帯電話網の帯域を圧迫するためユーザにとって気軽に利用できる料金での提供は難しいものとなる。また、これらのインフラに依存した通信手段は大規模な災害発

生時において、無線基地局へのトラフィックの集中や故障の発生等によって有効に機能しない可能性がある。これらの問題に対して、車車間通信を用いて自律的に構築されるVANET（Vehicular Ad-hoc Network）では、災害の影響を受けずに被災地での通信が容易に実現可能である。安全運転支援システムの効果的な利用のための車載器の普及だけでなく、被災地での通信インフラの早期復旧の点において、車車間通信を用いた大容量通信の実現は重要な課題である。

近年では、米国を中心にITS向けの通信規格としてIEEE802.11pの利用が検討されている。IEEE802.11pは従来の通信規格と比べて広域での大容量通信が実現可能であるが、安全情報伝達などの即時性の高いアプリケーションのために開発されており、エンターテインメント向けの動画データの伝達などに帯域を自由に使えない可能性がある。一方で、広く一般的に利用されている無線LAN規格のIEEE802.11gと車車間通信を用いて大容量通信を実現するための研究として、車両と路肩に設置された基地局との間での通信を中継することで、インターネットアクセス可能な領域を拡大する方法が考えられている[1]。特に、近年の無線通信機能を持ったタブレット端末の普及により、少ない設備投資により広範囲でのインターネットアクセスの実現が可能だと考えられる。しかしながら、無線通信では、限られた帯域を複数のノードが競合して利用するため、

¹ 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

² 大阪大学 サイバーメディアセンター
Cybermedia Center, Osaka University

送信端末数の増加に伴う送信遅延や、隠れ端末問題によるパケットの衝突が発生し、スループットが低下する問題がある。また、車車間通信において通信機会の増加や進行方向の領域に関する情報の取得などの点から、対向車との通信を行う際に、車両間の相対速度が大きいために、通信可能時間が短く十分な量の情報の伝達が行えないという問題がある。したがって、車車間通信を利用した大容量通信の実現のためには、これらの問題を解決した新たなシステムが必要である。

そこで、本論文では車車間通信を用いて走行中の車両間で大容量通信を可能にするために、車両の位置情報に基づいた複数無線チャネルを利用したデータ配信手法を提案する。IEEE802.11g は干渉しない 3 または 4 つのチャネルが利用可能であるため、単一チャネルのみを利用する場合と比べて混信の影響が軽減され、大容量の通信が期待できる。提案手法では、各交差点と交差点間をつなぐ道路を無線電波が到達可能な大きさの領域（セルと呼ぶ）に区切り、隣り合うセルとの電波干渉を考慮して各セルにチャネルを割り当てる。各車両は GPS により自身の正確な位置情報を取得して、自身が所属するセルを把握し、それぞれのセルに割り当てられたチャネルを利用することで、チャネル競合に伴う輻輳の発生を抑えることができる。また、データ通信はブロードキャストを用いて行うことで、コネクションが不要となり、車両の高速移動に対応可能である一方、セルは無線電波到達範囲に収まるサイズであるため、隠れ端末問題が発生しにくい。さらに、各車両には帯域へのアクセス待機時間に比例した優先度が設定されるため、車両数が変動した場合においても公平に送信権が得られる。

提案手法の性能評価のために、単一チャネルを用いる従来手法との比較を行った。シミュレーション環境として、動画広告用のビデオクリップを数種類生成し、各手法を用いて車両ネットワークへ流布した場合の性能について評価した。結果より、提案手法は他の手法と比べて車両密度が高い混雑した状況下でも高いスループット能力を持つことを確認した。また、シミュレーション完了時の各車両が取得できたビデオクリップ数についても、提案手法は比較手法と比べて多くビデオクリップを高い完成度で取得できていることを確認した。

以降、2 章では関連研究について述べ、提案手法の位置づけを明確にする。3 章で本研究で提案する大容量データ配信手法について詳しく述べる。4 章で提案手法の評価として従来手法とのシミュレーション上での実験結果と考察を述べる。5 章で本論文の結論を述べる。

2. 関連研究

本章では、VANET における情報伝達に関する既存研究について紹介し、本稿で提案する手法の必要性和新規性について述べる。

2.1 VANET の特徴

VANET では無線通信機能を有した移動車両（以下、ノード）によってネットワークを形成するため、そのネットワークには（1）車両の高い移動性によるネットワークトポロジの動的な変化、（2）道路や交差点などの物理的構造に沿った特徴的なノードの移動パターン、（3）対象となるネットワークが広範囲であることに加えて（4）単位面積当たりのノード数の分布が不均衡といった特徴がある。これらの特徴に加えて、無線通信環境にて考慮すべき問題として、各ノードの無線電波の到達範囲が制限されているために、電波の干渉が頻発し、正常なデータ通信が行えない隠れ端末問題がある。以下、これらの VANET の特性や無線通信の特性を考慮した情報伝達の効率化を目的とした研究を紹介し、提案手法の位置づけを明確にする。

2.2 位置情報に基づくマルチチャネルの利用

無線通信において、マルチチャネルの利用は複数の無線通信が互いの電波に影響なく行えるようになるため、単一チャネルでの無線通信と比べて空間の効率的な利用が見込めるが、事前に送信側と受信側のチャネルを合わせる手段を持たなければならない。論文 [2], [3] では、利用可能な複数のチャネルのうち、1 チャネルを送信権の獲得や利用するチャネルの交渉のためのコントロールチャネルとして利用している。この方法は単一チャネルのみを使う場合と同様の手順で容易に複数のチャネルを利用することが出来るが、無線チャネルの 1 つがコントロールチャネルとして占有されてしまう点や、データ通信のための事前交渉が共通のチャネルで行われるためスループットを最大限にすることが難しい。加えて、あるチャネルでデータ通信中のノードらは、その間に異なるチャネルで別の通信が開始されたことを検知できないため、複数無線チャネル固有の問題である複数無線隠れ端末問題が起りうる可能性がある。

一方で、ノードの移動特性に着目し、ノードの位置情報によって使用するチャネルやタイムスロットを切り替える研究がある [4], [5]。論文 [4] では、道路を複数のセルに分割し、各セルに対して占有のタイムスロットを割り当てる手法を提案したが、各車両が利用できる帯域が非常に少ないといった問題がある。この問題に対して、論文 [5] では、車両の向きに応じて複数のチャネルを割り当てることで使用可能な帯域幅を増加させる MM-SA パケット転送方式を提案している。しかしながら、道路の形状ではなく、東西南北の 4 方向によって車両の所属するグループを割り当てているため、日本のような狭く、曲線の多い道路への適用については十分に考慮されていない。

近年では、インターネットに接続可能なスマートフォンやタブレットなどの高機能な端末が広く普及してきている。これらの端末には WiFi を利用することによって端末間で直接無線通信が可能なものも存在する。これらの端末

を車両に持ち込み、移動する車両間で無線通信が実現できれば、新たに高機能なデバイスを車両に搭載することなく、車両間ネットワークが構築可能である。

そこで、本研究では、車両に持ち込んだスマートフォンやタブレットなどの高性能無線機器間でマルチチャネルを用いた大容量のデータ通信を実現するための配信手法について取り組む。提案手法では、車両の移動特性を考慮することで、各車両は他車両とのチャネル調整のための情報交換を必要とせずに、各自で判断できる仕組みを導入する。

2.3 大容量データ配信に適したメディアアクセス制御

VANET における情報配信は衝突回避や緊急メッセージなどの安全アプリケーションと、音楽や動画広告などの運転手や同乗者に対して快適性を提供する非安全アプリケーションの2つに分類できる。伝達遅延の最小化やメッセージの確実な到達性が求められる安全アプリケーションに対して、非安全アプリケーションは一般的に高いスループットが要求される。論文 [6] では、無線通信機能を有した路側機を用いて、走行中の車両に対して、マルチメディア情報を配信する手法を提案している。また、論文 [7] では、一時的な車両集団を形成し、集団内でデータの共有を目的とした手法を提案している。これらの研究で共通する部分として、それぞれ新たなメディアアクセス制御プロトコルを提案している点である。一般的な無線通信で使用されているメディアアクセスプロトコルである CSMA/CA は送信権の獲得のために多くの待ち時間を必要とし、結果的にスループットが高くなりにくい特性がある。また、CSMA/CA では公平性のために単一のノードが一回のメディアアクセスで1つのメッセージのみを送ることができるようになっているが、大容量データを限られた帯域で送受信するためには、サイズが数百 Bytes の緊急メッセージの送受信よりも長い時間メディアにアクセスする必要がある。したがって、メディアへのアクセス権を獲得した端末に対してメッセージ単位ではなく時間単位の帯域占有権を与えることが、大容量データの配信に効果的だと考えられる。

一方で、メディアアクセス遅延時間を短縮する目的で BlackBurst が提案され、改良されてきた [8], [9]。BlackBurst では、各車両はメディアへのアクセス権を得るために同時刻にビーコンを送信し、最も長いビーコンを送信した車両がメディアアクセス権を獲得する。ビーコンの長さは、直前に受信したメッセージの送信元の端末からの距離に比例しており、結果的に遠くの端末が次々にメッセージを中継することが出来る。この手法の着目すべき点はビーコンの長さに特別な意味を持たせることで、他にパケットの交換を必要とせずに近隣の端末に情報を伝えられる点である。

そこで、本研究ではメディアアクセス制御方式として、

時間を一定長のターンに区切り、ターンの開始時にビーコンの送受信による抽選を行い、最も長いビーコンを送信した車両に対して現在のターンの帯域の占有権を与える方式を提案する。このとき、ビーコンの長さは、帯域へのアクセス待機時間に比例して長くすることで、各端末のメディアアクセスについての公平性を確保する。

3. 提案手法

本章では、スループットの向上を目的とした VANET における大容量データ配信手法の詳細について説明する。図 1 に提案手法の概要図を示す。通信スループットの向上、及び隠れ端末の解消を目指し、提案手法は下記のアイデアを用いた。

地理空間のセル分割：提案手法は道路を複数の区域（セル）に分割し、それぞれに異なるチャネルを割り当てる。セルの長さは 100m~200m とし、車両がセル内を走行する際、そのセルに割り当てられたチャネルを利用し、同じセルにある車両と通信を行う。各車両は自身の位置情報から使用するチャネルを判断できるため、他の車両とのチャネル調整が不要となり、その分の時間をデータ通信に利用可能である。加えて、チャネル調整のための専用のチャネルも不必要となる。セルを分割する際、車両の移動特性を考慮し、(1) 同じ進行方向の車両との通信を目的としたセル、(2) 対向車や右左折待ちの車両との通信を目的としたセル、目的や地形別に2種類のセルを用意することで、車両間の通信を円滑に行わせる。セル分割の詳細について 3.2 節で述べる。

チャネル割り当て：隣接セルに異なるチャネルを割り当てることにより、セル間の電波干渉を抑制し、データ到達率を向上させる。また、道路を走行する複数の車両は、異なるチャネルを利用することにより、互いに干渉しない複数の通信を行うことが可能となる。なお、セルのサイズによって、隠れ端末を完全に防止することはできないが、発生する確率が低くなる。チャネル割り当ての方針について 3.3 節で述べる。

メディアアクセス制御：スループットを最大化させるために、提案手法は CSMA/CA の代わりに、独自のメディアアクセス制御方式を利用する。セル内の各車両は一定の周期ごとに送信権の獲得を試み、獲得した車両は次の周期までに帯域を独占し、高いレートでデータを送信する。また、送信権獲得できなかった車両の優先度を少しずつ上げていくように、公平性を保たせる。メディアアクセス制御の詳細を 3.4 節で述べる。

3.1 仮定

本節では、提案手法が対象とするアプリケーションの仮定、環境に関する仮定、端末に関する仮定、配送するメッセージに関する仮定について述べる。

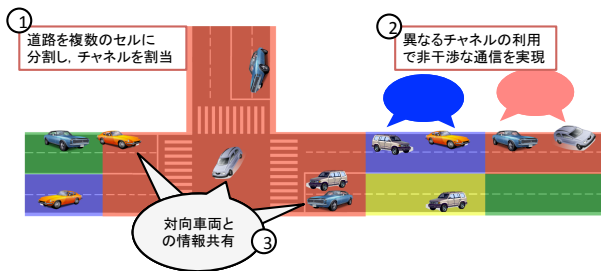


図 1 提案手法の概要図

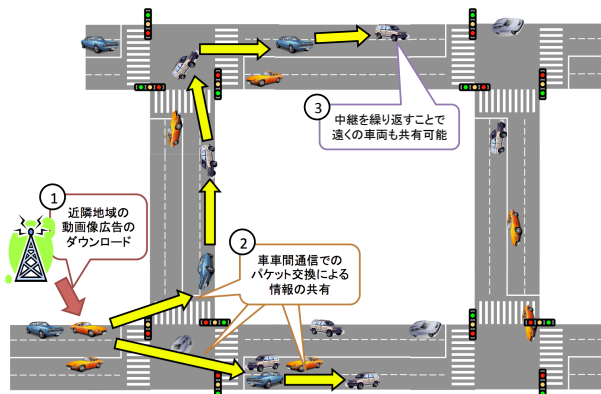


図 2 想定アプリケーションの概要図

3.1.1 対象とするアプリケーションの仮定

本研究が対象とするアプリケーションは、インターネット接続可能な端末によって生成されるオリジナルデータを複数の小さなメッセージに分割して、ネットワークに流布し、別の端末がメッセージを収集してオリジナルデータを取得するアプリケーションである。図 2 に想定するアプリケーションの概要図を示す。オリジナルデータには緊急性はなく収集にはある程度の遅延時間が許されている。各メッセージには生存時間が設定されており、生存時間が過ぎると破棄される。オリジナルデータの種類としては、ある一部の局所的な地域で主に利用価値のあるデータを対象としている。具体的には、現在地近辺の地図情報や現在の道路状況を表す動画像、近隣店舗の動画広告などを想定する。

3.1.2 環境に関する仮定

本研究では対象とする環境として、国道や交通量の多い県道などからなる一般的な道路網を持つ都市部を想定する。都市部の道路網は、交差点の集合 V と交差点間の道路の集合 E から構成されるグラフ $G = (V, E)$ で表され、車両はこのグラフの任意の地点を走行する。全ての交差点 $v \in V$ は緯度経度の組の情報が含まれているとする。全ての道路 $e \in E$ は、対向車線の有無と道路の形状の情報が含まれているとする。

3.1.3 端末に関する仮定

各車両にはアプリケーションを稼働させるための端末を搭載し、以下を仮定する。

- IEEE802.11 に準拠した無線通信機器（単一アンテナ）
- GPS など諸センサー（車両位置情報精度 1m）
- デジタル地図を表示できる設備
- メッセージを保存するためのストレージと提案手法を実行するための計算機器

ここで、以上の仮定を満たすデバイスとして iPhone や Android 端末などのスマートフォンが該当する。また、これらの高機能な端末では現在地を表示する地図アプリケーションが利用可能であるが、インターネットが接続できない場所などでは機能しない。そこで、別のストレージにデジタル地図を保存しておくことで、インターネット接続環境が無い状況でも本アプリケーションを実行させることができる。また、無線通信機器では同時に 4 つまでのチャネルが互いに干渉なく利用可能なものとする。以後、車両に搭載された、または人が車内に持ち運んだ端末のことをノードと表現する。

3.1.4 メッセージに関する仮定

メッセージはオリジナルデータ集合 D に属するオリジナルデータ $d \in D$ を一定のサイズで分割したデータ P_d 、 P_d のメタデータ M_{P_d} およびパケットの生存期間 t_{tl} からなる 3 項組 (P_d, M_{P_d}, t_{tl}) から構成される。ここで M_{P_d} は P_d が d のどの位置の断片であるかなどの情報である。生存期間が切れたメッセージは、ストレージから破棄されるとする。

3.1.5 セルに関する仮定

セルの集合を C で表現し、以下の仮定を行う。全てのセル $c \in C$ は、作成された場所の情報として道路 $e \in E$ または交差点 $v \in V$ のどちらかを持つものとする。また、作成された場所が道路であれば道路セル、交差点であれば交差点セルとして扱う。制約条件として、各セルが割り当てられる領域は重複しない。セルは基本的に最小サイズ $cell_{MIN}$ と最大サイズ $cell_{MAX}$ を満たす大きさで作成される。

3.2 地理空間のセル分割

提案手法では、車両の移動特性およびデータ流布の効率性を考慮して、異なる目的を持った (1) 交差点セル (2) 道路セルの 2 種類のセルを用意する。図 3 に道路セルと交差点セルの位置関係を示す。交差点セルでは、交差点における対向車や右左折待ちの車両との通信を目的としており、現在向かっている地点に関連する情報の取得が期待できる。道路セルでは、同じ進行方向の車両とデータ共有を目的としており、相対速度が小さく信頼性のある通信が長時間行えるため、交差点セルで受信したデータに関する補完を行える。

本研究では、隠れ端末問題を考慮して各セルのサイズを決定するために、周辺の環境によって伸縮する無線通信範囲の平均的な距離として 100m を想定する。道路セルの最

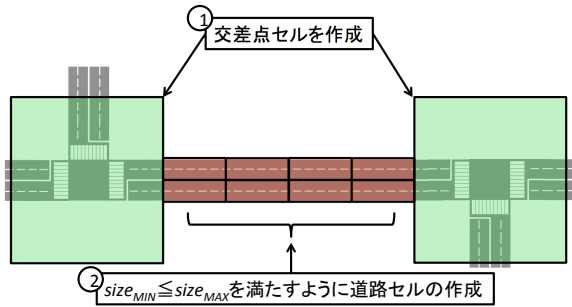


図 3 道路のセル分割手順

Algorithm 1 セル分割アルゴリズム

```

入力：マップ情報  $G = (V, E)$ 
for 道路  $e \in E$  do
   $e$  の両端の交差点  $v_1, v_2 \in V$  を取得.
   $L \leftarrow dist(v_1, v_2)$ 
  if  $L \leq 200m$  then
     $v_1, v_2$  から互いに 50m の道路を交差点セルとして分割
    残りの道路を 200m 単位で分割する.
    if 200m 未満の余りがある then
      道路セルの数を増やし各セルの縮小して均等のサイズに
      調整する.
    end if
  else if  $L \geq 100m$  then
    対向車線のセルと結合したセルを作成
  else
    縮小した交差点セルを作成
  end if
end for
return セル集合

```

小サイズ $size_{MIN}$ として無線通信範囲である 100m を設定することにより、チャンネルの割割当時には隣り合うセルのチャンネルのみを意識すれば良い。また、同一セルの車両数を増やすために、道路セルの最大サイズ $size_{MAX}$ を無線通信範囲を最大限に利用した 200m とする。これにより、隠れ端末による影響を抑制しつつ、多数の車両との通信機会を向上を図る。一方で、車両数が多くなりやすい交差点セルは、右左折方向の車両との通信も確実に行えるようにするために、交差点の中心から 50m の領域とする。

道路を複数のセルに分割する手順として Algorithm1 に擬似コードを示す。dist() 関数は与えられた交差点間の距離を計算し、その結果は L に格納される。分割手順の概略として、道路上の隣り合う任意の交差点を選び (1) 交差点セル、(2) 道路セルの順に各セルを作成し、これを全ての交差点間の道路に対して実行している。

3.3 チャンネル割当

3.2 節にて得られたセル集合に対して、隣接および斜めに位置するセルに対し異なるチャンネルを割り当てる手順について説明する。提案手法では、現在所属しているセルが

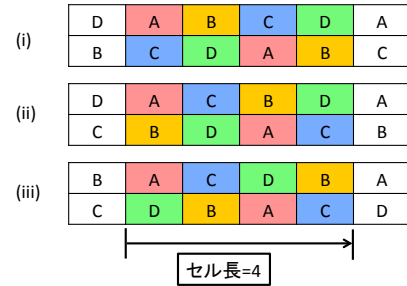


図 4 チャンネル割り当てのパターン

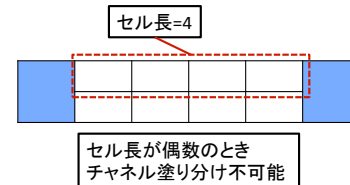


図 5 チャンネル割り当て失敗の例

使用するチャンネルとは異なるチャンネルが近隣 100m のセルに割り当てられることで、近隣セル間のチャンネルの干渉が発生しない。これにより、隠れ端末と成りうる車両が存在する領域は自身が所属するセルのみとなり、単一チャンネルのみを使用する手法と比較して隠れ端末の発生が抑制できる。また、単一チャンネルでは干渉しあう距離であっても、異なるチャンネルは干渉なく通信が可能であるため、空間的な帯域の利用効率が向上し、スループットの向上が期待できる。

格子状の道路セルに異なるチャンネルを割り当てるパターンとして図 4 に示す 3 つが考えられる。図において、A～D は異なるチャンネルを表しており、各パターンの左右に交差点セルが接続する形となる。なお、各パターンの一部の列の上下のチャンネルを入れ替えたパターンは同一のものとしてみなす。例として、パターン (i) の左側に交差点セルが接続する場合について考える。この時、交差点セルに接している道路セルのチャンネルは D と B であり、チャンネルを上下で入れ替えても交差点セルに影響はない。ここで、図 4 の (iii) のように、交差点セルに進む際に進入するセルの数をセル長と呼ぶこととする。提案手法では上記の 3 パターンのセル長を増減させたものを用いてセルにチャンネルを割り当てる。

以上の手順に従って各セルのチャンネル割り当てを行う際、次のことがいえる。セル長が奇数であれば、接続する交差点セルに割り当てられたチャンネルに対して必ず道路セルのチャンネル割り当てが成功するパターンが存在する。一方で、道路セル長が偶数の場合、両端の交差点セルが同じチャンネルが割り当てられると、どのパターンを用いても割り当て不可能である (図 5)。

そこで、提案手法では、交差点セルのチャンネル割り当てを最初に行い、セル長が偶数である道路の両端の交差点の

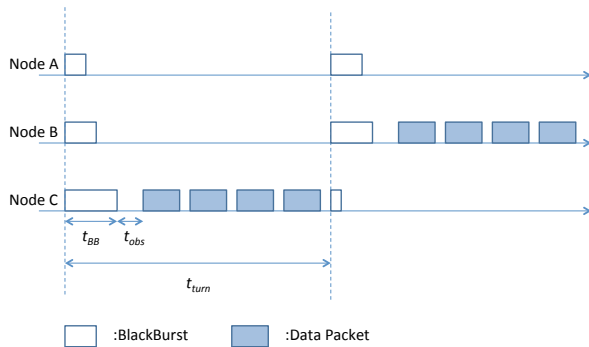


図 6 BlackBurst と送信権の獲得

チャンネルが同じチャンネルにならないようにする。交差点セルのチャンネル割り当てでは、偶数セル長である道路の両端のチャンネルは異なるチャンネルになるように全ての交差点セルのチャンネルを決定する。この時、条件を満たすチャンネルの割り当てが出来なかった場合、道路分割処理に戻り、割り当てが困難である道路のセル数を 1 つ増やし、交差点セルのチャンネル割り当てが条件を満たすように調整する。

3.4 メディアアクセス制御

本節では GPS による時刻同期のもと、一定期間の帯域占有を獲得するメディアアクセス制御方式について説明する。本方式では、時間を一定長のターンに区切り、それぞれのターン開始時に各車両がランダムな長さのビーコンを送信し、最も長いビーコンを送信した車両は自身以外にビーコンを送信している車両がないと判断することで、現在のターンの帯域占有権を獲得する。これにより、少ない競合待ち時間で多くのメッセージを連続して送ることが可能になり、特に大容量データの配信に有効的に働くと考えられる。一方で、帯域を専有する期間が長いと、車両間の公平性を損なわれる可能性がある。そこで、車両間の公平性を高めるために、帯域の占有権が得られていない期間が長い車両ほど、ビーコンを長く送信できるように工夫している。

具体的なメディアアクセス権の獲得およびメッセージ送信手順を図 6 に示す。図において、各ノードは長さ t_{turn} のターンの開始時にランダムな長さ t_{BB} のビーコンを送信する。自身のビーコンの送信が終わった際に他のノードからのビーコンを受信したノード A および B は、現在のターンでのアクセス権を諦めて、自身のビーコン長 t_{BB} に 1 タイムスロット t_{BBslot} を加えて、受信待機する。自身のビーコンの送信が完了し、 t_{obs} の間他のノードからのビーコンを受信しなかったノード C はアクセス権を獲得し、現在のターンの終了時刻まで帯域を占有できる。現在のターンが終了時刻を迎えると、アクセス権を獲得したノード C は自身のビーコン長 t_{BB} を初期化 (1 タイムスロット t_{BBslot}) する。その後、次のターン開始時刻に再度ビーコンを送受信することでアクセス権の獲得とデータの送受信を繰り返

し行う。

本研究では、この方式に対してマルチチャネルを導入する。各ノードは毎ターンの開始時に現在所属しているセルに割り当てられたチャンネルを確認し、同ターンの間利用し続ける。これにより、ターン開始時に同一セルに所属していたノードらは同ターンが終了するまで通信を確立することができる。

4. 評価

提案手法の性能を評価するために、シミュレーションによる比較実験を行った。

4.1 実験環境

4.1.1 想定アプリケーション

評価を行う際のアプリケーションとして車両間での動画広告の共有アプリケーションを設定した。本アプリケーションでは、インターネットに接続可能な数台の端末が、それぞれ異なる種類の動画広告を携帯電話網からダウンロードし、WiFi による短距離無線通信を介したパケット交換により、ネットワーク全体に広告を伝搬させる。実験では、流布する動画広告として一般の TVCM と同程度の長さである 15 秒間のフル HD 画質のビデオクリップを想定し、データサイズを 2Mbytes とした。なお、シミュレーションの開始 100 秒間は、ネットワークに車両が十分に行き渡らせるために、通信は開始していない。実験では、シミュレーション開始 100 秒後に 3 から 5 秒間隔で、ランダムな車両から各ビデオクリップを配信開始する。実験中では生成させるデータの種類を変化させ、各種法の結果の差について考察を行った。

4.1.2 想定環境

実験環境として、片側 3 車線 (対面 6 車線) の各交差点間が 400m のマンハッタンモデルを採用した。全ての十字路には信号が設置されており、あらかじめ決められたタイミングで信号を変化させる。また、各車両は制限速度 60km/h を超えないように移動し、交通状況や右左折を行う際には適宜減速を行う。図 7 に実験で使用する道路網を示す。シミュレーションで利用した各パラメータを表 1 に示す。

4.1.3 交通流ログデータの生成

車車間通信を利用するプロトコルの妥当な評価のためには、現実的な車両の挙動を元に通信シミュレーションを行うことが必要である。そこで、本実験における交通流ログデータの生成は、SUMO (Simulation of Urban Mobility) を用いた [10]。SUMO は主としてドイツ航空宇宙センターが開発している交通流生成シミュレータであり、GPL ライセンスの下でオープンソース化されている。SUMO によって生成される車両は各道路に定められた法定速度を超えないように、道路網のランダムな位置に最短経路となる交差

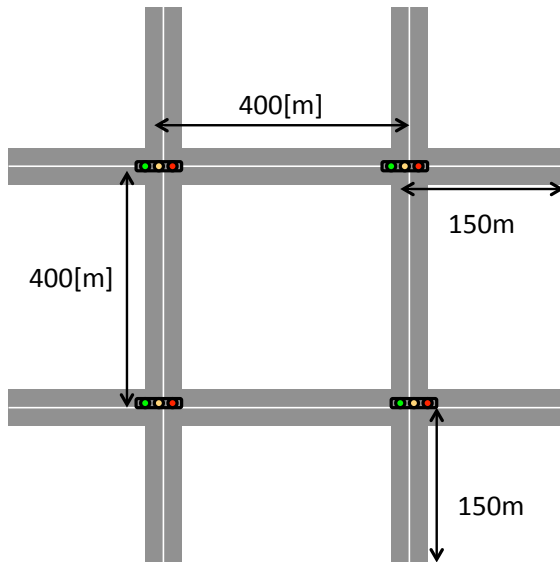


図 7 シミュレーションマップ

表 1 シミュレーションパラメータ

Parameter	Value
SIFS	9 μ s
Time slot	9 μ s
DIFS	34 μ s
t_{BBSlot}	20 μ s
t_{obs}	20 μ s
t_{turn}	100 ms
フィールドサイズ	700 x 700 m^2
発生車両台数	344, 613, 939 台
計測時間	500 s
$cell_{MIN}$	100 m
$cell_{MAX}$	200 m
t_{ttl}	100
t_{carry}	3 sec
d_{carry}	100 m

点を経由して移動する。また、各車両は必要であれば車線変更や追い越しを行い、右折時には対向車両の合間をぬって移動するなど、現実的な車両に近い挙動をとる。各車両は道路網上のランダムに始点と終点を決定し、終点に向かって最短経路となるように移動する。実験では、SUMOで出力した交通流ログデータをネットワークシミュレータに入力として与えた。

通信シミュレーションは自作のネットワークシミュレータ上に実装した。ネットワークシミュレータでは、IEEE802.11gを通信規格として無線到達範囲を120m、同一無線通信範囲内での利用可能帯域を6Mbps、チャンネル数を4とした。ネットワークシミュレータにおける物理層の実装として、パケットの伝送成功率に伸上m分布[11]を用いた。

4.2 比較手法

提案手法との比較実験の対象として、提案手法のマルチチャンネル未導入の方式であるProposal-singleとCSMA/CAの2つの手法を用いた。

4.2.1 Proposal-single

Proposal-singleでは使用可能なチャンネル数を1とし、道路のセル分割を行わない。各車両は提案手法と同一のメディアアクセス制御方式を用いて送信権を獲得する。この手法との比較により、提案手法によるマルチチャンネルの導入による性能の変化を考察する。

4.2.2 CSMA/CA

CSMA/CAでは送信権の獲得のために各ノードがランダムバックオフ時間のタイマーを起動し、タイマーが0になった際に、帯域が使用されていないならば送信権を獲得する。送信権の獲得後はパケットを1つだけ送信し、再度ランダムバックオフ時間を設定し、タイマーを起動する。この手法との比較により、送信権獲得車両に対してパケット単位ではなく、時間単位で送信できる権利を与えたことによる性能への影響を考察する。

4.3 評価項目

本提案手法の評価項目として、以下の2つを挙げた。

4.3.1 ネットワーク全体のスループット

各車両が単位時間[sec]あたりに受信したメッセージの総和を示す。値が高いほど、ノード間で多くの通信が成功している。

4.3.2 ビデオクリップ完成度

シミュレーション終了時の各車両が受信した断片によって構成されるビデオクリップの完成度の割合を表す。完成度が高いビデオクリップの数が多いほど性能が良い。

4.4 実験結果と考察

実験として、ネットワークに流入する車両台数を344, 613, 939台と変化させた場合についての比較を行った。それぞれの実験における平均的な車両密度は、0.9, 1.9, 3.5[台/100m/車線]である。また、ネットワークに流入する車両に対して流出する車両数が少ないため、シミュレーションの時間経過に伴いネットワーク内の車両数は平均台数よりも多くなっている。

4.4.1 ネットワーク全体のスループット

車両台数を変化させた場合のネットワーク全体のスループットについて比較を行った。本実験では5種類のビデオクリップを発生させた。図8に発生車両台数ごとのグラフを示す。

図8(a)より、提案手法が最も高く、CSMA/CAが最も低いスループットであることが確認できた。しかしながら、提案手法とProposal-singleは大きな差が見られない。これは、車両密度が低いために、提案手法においてはセル

ごとの車両数が少なくなり、1回の送信に対して受信できた量が Proposal-single と比べて少なくなったことが原因と考えられる。しかしながら、セルごとに異なる通信を実行可能であるため、単位時間あたりの通信数を増やすことができ、結果として Proposal-single と比べてスループットの増減が小さくなったと考えられる。また、CSMA/CA の性能が低い理由として、隠れ端末問題の影響が大きいと考えられる。提案手法と Proposal-single は送信権のための競合を 0.1 秒毎に行いメッセージを連続して送信可能である一方で、CSMA/CA では通信ごとに不規則な時刻に競合を行うため、その結果隠れ端末によるメッセージの衝突が頻繁に発生し低いスループットになったと考えられる。

図 8 より、車両密度を増加させた場合でのスループットへの影響が確認できる。提案手法と Proposal-single 手法は車両台数の増加に伴い、スループットも比例して大きく増加していることが確認できる。一方で、CSMA/CA も増加は確認できるが、他の 2 手法と比べてその差は僅かである。これは、提案手法と Proposal-single では送信権獲得の競合が定期的な時刻に行われているため、車両密度の増加によってブロードキャスト時の受信車両数の増加が性能への好影響を及ぼしている一方で、CSMA/CA では受信車両数の増加による性能への影響よりも、隠れ端末が発生しやすい状況による悪影響が大きかったと考えられる。また、提案手法は車両密度が高くなるほど性能が向上し、Proposal-single 手法に比べて最大で 1.5 倍の性能が確認できた。以上のことから、提案手法のセル分割によるマルチチャネルの導入が効果的だと言える。

4.4.2 ビデオクリップ完成度

シミュレーション終了時の各車両におけるビデオクリップの完成度についての比較を行った。図 9 に生成ビデオクリップ数を 15 としたときのビデオクリップの完成度のグラフを示す。なお、各図において、x 軸が小さいときにグラフの傾きが大きいほど、未完成のビデオクリップが多く、x 軸が大きい時にグラフの傾きが大きいほど、ビデオクリップの断片をほぼ全て受信完了できていることを示す。

全ての図より、提案手法は他の手法と比べて完成度の低いビデオクリップの数が少なく、100%に近い完成度のビデオクリップが多いことが確認できる。しかしながら、車両密度が少ない場合での結果を示す図 9 (a) では、完成度の高いビデオクリップ数の割合が比較手法である Proposal-single よりも少なくなった。この現象は他の車両密度が増加した場合については見られないため、マルチチャネルのためのセル分割によるセルあたりの車両数の低下が影響したと考えられる。また、CSMA/CA のグラフは全て、x 軸が小さい部分で傾きが大きく、その後は緩やかになっていることが確認できる。しかしながら、同じ単一チャネルの Proposal-single は、CSMA/CA よりも十分に良い性能が確認できる。

以上のことから、データ配信手法の性能へ強く影響を与えるものとしてメディアアクセス制御方式が考えられる。Proposal-single 手法では本論文で提案した一定長の帯域占有権をメディアアクセス権に対して与える方式を利用しているおり、メッセージ単位の帯域へのアクセスを付与する CSMA/CA と比較すると、隠れ端末による影響が CSMA/CA では大きいと考えられる。特に、CSMA/CA ではメディアアクセスのための競合の回数が多くなり、加えて競合の時刻が不定期であることが大きく影響していると考えられる。一方で、隠れ端末問題の解決には時刻同期による競合時刻の同期と、時間単位での帯域へのアクセス権の付与が非常に効果的であるといえる。

5. 結論

本論文では、無線通信機器を搭載した車両に対して動画広告を配信する際のスループットの最大化を目的として、車両の位置情報を基に複数の無線チャネルを利用する大容量データ配信手法を提案した。提案手法では、道路を複数のセルに分割し、それぞれに異なるチャネルを割り当てる。各車両は自身が現在走行中のセルに割り当てられたチャネルを用いて無線通信を行うことで、隠れ端末の抑制が期待できる。また、大容量データの配信に適した新たなメディアアクセス制御方式を導入した。本方式では時間を一定時間のターンに区切り、毎ターンの開始時に各車両がビーコンを送信し、最も長いビーコンを送信した車両に対して現ターンの間帯域への占有権を与える。提案手法ではメディアアクセスまでの待機時間が長い車両に対してビーコンを長く送信するように優先度を変更することで、公平性を図る。

提案手法の大容量データ配信における性能を評価するため、交通流シミュレータ SUMO とネットワークシミュレータを用いたシミュレーション実験を行った。実験環境として 2MBytes の動画広告のビデオクリップを 5~15 種類生成し、車両密度を増加させた際の性能を評価した。比較対象として、従来より一般的に用いられている MAC プロトコルである CSMA/CA および提案手法において単一のチャネルのみを利用した場合の手法を設定した。その結果、車両密度が 3.5[台/100m/車線] の比較的混雑した場合においても、提案手法は比較手法よりも高いスループット性能が得られた。特に、提案手法においてマルチチャネルを導入する前後で比較した場合、最大で 50%の性能向上を確認できた。また、データの配信性能に関しても、マルチチャネルを導入する前の手法と比較して約 24 %多くのメッセージを配信できた。さらに、CSMA/CA との同様の比較実験では、車両密度が増加しても安定して通信が継続できることが確認できた。

以上の実験結果から、提案手法におけるメディアアクセス方式である時間単位での送信権の付与は、大容量データ

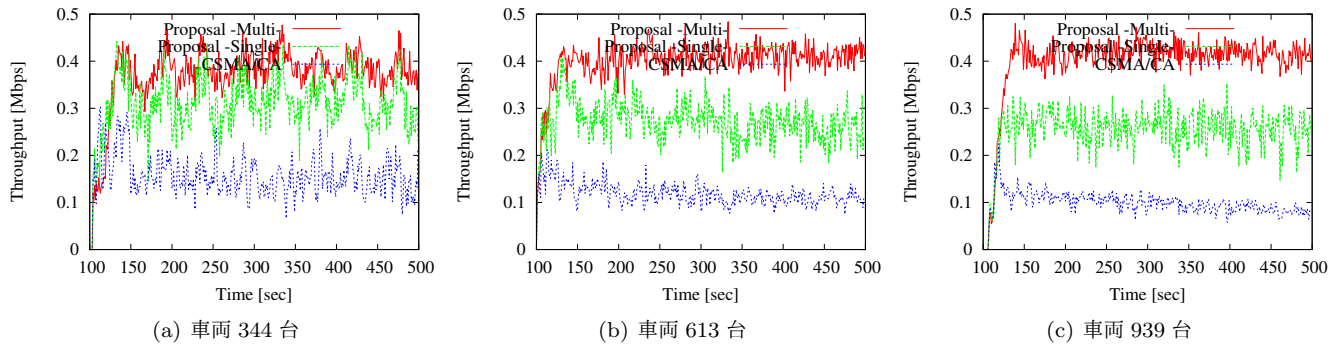


図 8 ネットワーク全体のスループット

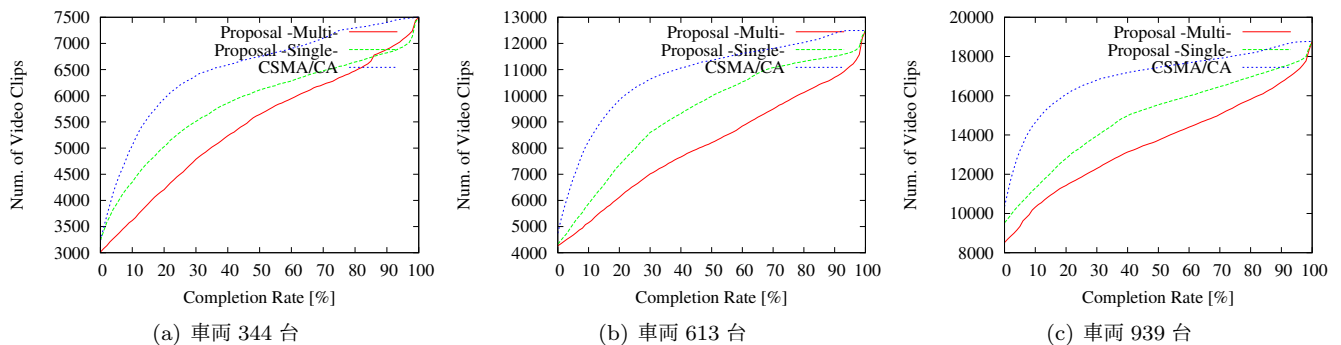


図 9 ビデオクリップ完成度

の配信において特に有効的であり、加えて、マルチチャネルの利用は車両の密度が高い環境において効果的に働くことが知見として得られた。

今後の課題として、スループットを維持しながら配信性能の向上が挙げられる。各車両の要求データへのリクエストとその応答処理に対応するために、各車両の要求を授与する機構を検討する必要がある。

参考文献

- [1] Gerla, M. and Kleinrock, L.: Vehicular networks and the future of the mobile internet, *Computer Networks*, Vol. 55, No. 2, pp. 457–469 (2011).
- [2] Bi, Y., Liu, K., Cai, L., Shen, X. and Zhao, H.: A multi-channel token ring protocol for QoS provisioning in inter-vehicle communications, *Wireless Communications, IEEE*, Vol. 8, No. 11, pp. 5621–5631 (2009).
- [3] Han, C., Dianati, M., Tafazolli, R. and Kernchen, R.: Asynchronous Multi-Channel MAC for Vehicular Ad Hoc Networks, *Vehicular Networking Conference (VNC), 2011 IEEE*, pp. 109–115 (2011).
- [4] Katragadda, S., Ganesh Murthy, C., Ranga Rao, M., Mohan Kumar, S. and Sachin, R.: A decentralized location-based channel access protocol for inter-vehicle communication, *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semi-annual*, Vol. 3, pp. 1831–1835 (2003).
- [5] Yomo, H., Shagdar, O., Ohyama, T., Miyamoto, M., Kondo, Y., Hasegawa, J., Sakai, T., Miura, R. and Obana, S.: Development of a CDMA intervehicle communications system for driving safety support, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 16, No. 6, pp. 24–31 (2009).
- [6] Bi, Y., Cai, L., Shen, X. and Zhao, H.: Medium Access Control for QoS Provisioning in Vehicle-to-Infrastructure Communication Networks, *Mobile Networks and Applications*, Vol. 18, No. 2, pp. 174–185 (2013).
- [7] Yang, Z. and Cao, G.: V-PADA: Vehicle-Platoon-Aware Data Access in VANETs, *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 60, No. 5, pp. 2326–2339 (2011).
- [8] Sobrinho, J. and Krishnakumar, A.: Quality-of-Service in Ad Hoc Carrier Sense Multiple Access Wireless Networks, *Selected Areas in Communications*, Vol. 17, No. 8, pp. 1353–1368 (1999).
- [9] Gotzhein, R. and Kuhn, T.: Black Burst Synchronization (BBS) A protocol for deterministic tick and time synchronization in wireless networks, *Computer Networks*, Vol. 55, No. 13, pp. 3015–3031 (2011).
- [10] German Aerospace Center: SUMO - Simulation of Urban MObility, German Aerospace Center (online), available from <http://sumo-sim.org/> (accessed 2014).
- [11] Killat, M., Schmidt-Eisenlohr, F., Hartenstein, H., Rössel, C., Vortisch, P., Assenmacher, S. and Busch, F.: Enabling efficient and accurate large-scale simulations of VANETs for vehicular traffic management, *Proceedings of the fourth ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pp. 29–38 (2007).