

車両アドホックネットワークにおける 道路網構造を考慮したジオルーティング手法

赤松 諒介^{1,a)} 小原 啓志^{1,b)} 重野 寛^{1,c)}

受付日 2014年5月13日, 採録日 2014年11月10日

概要: 車両アドホックネットワークでは, 車車間通信を用いたマルチホップな情報伝搬によって広範囲の情報収集・分配を実現する. 車両ネットワークがサポートする典型的なアプリケーションとして, 基地局が広範囲の道路交通情報を収集するシナリオが考えられるが, 全体の通信オーバーヘッドを抑制するとともに, 基地局に対する高いパケット到達性を実現するルーティングプロトコルが求められる. 従来の研究では多くのパケット中継アプローチが提案されてきたが, 現実の道路環境に適用する場合の検討が不十分であり, 複雑な道路網構造や車両分布の偏りに対応できず, パケット到達性が低下する. そこで本論文では, 道路網構造に基づくジオルーティング手法 SRS を提案する. SRS では, 道路トポロジに基づいた通信経路算出と, 中継車両による動的経路修復により, 通信量の増加を抑制しつつパケット到達性を改善する. シミュレーション評価では, パケット到着率, 送信パケット数の観点から提案手法 SRS の有効性を示す.

キーワード: 車両アドホックネットワーク, 車車間通信, ジョルーティング, 道路網構造

Geo-routing Protocol Based on Road Network in Vehicular Ad Hoc Networks

RYOSUKE AKAMATSU^{1,a)} KEIJI OBARA^{1,b)} HIROSHI SHIGENO^{1,c)}

Received: May 13, 2014, Accepted: November 10, 2014

Abstract: In vehicular ad-hoc networks, the multi-hop data propagation with vehicle to vehicle (V2V) communication enables the data collection and distribution in large area. A probable application supported in vehicular networks is that a base station collects traffic information beyond its transmission range. In this case, the application requires a routing protocol that achieves high packet reachability as well as suppression of forwarding overhead. Although existing protocols proposed various packet forwarding strategies, researches in realistic urban environments are not discussed enough. In this paper, we propose a source geo-routing protocol based on road network structure (SRS). SRS provides the path calculation based on road topology obtained by a digital map and also employs the dynamic route recovery strategy. Simulation evaluations show expected results in terms of the packet delivery ratio and the number of packet transmissions.

Keywords: VANETs, V2V communication, geo-routing, road network

1. はじめに

自動車の安全性や利便性の向上, 環境負担の低減を目

的として, 高度交通システム (Intelligent Transportation Systems; ITS) に関する取り組みが進められている. 車車間通信を利用して形成される車両アドホックネットワーク (Vehicular Ad Hoc Networks; VANETs) は, ITS における多様なアプリケーションの実現に不可欠な要素として, 広く研究が行われている. VANETs では, 無線通信機を搭載した車車間でアドホック通信を行うことで, リアルタイム性と柔軟性を持つネットワークの構築が可能となる.

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

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

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

車両ネットワークがサポートする典型的なアプリケーションとして、インフラレスでリアルタイム性の高い道路交通情報の収集・分配アプリケーションが考えられる。道路交通情報をリアルタイムに配信するサービスの例として、ITS スポットサービス [1] が実際に展開されている。道路に沿って設置されたインフラが車両の走行情報を収集し、センタで道路交通情報に編集・加工したうえで、再びインフラを通じて各車両に情報を分配するサービスである。ITS スポットサービスでは路車間の通信のみが行われるが、各インフラの情報収集エリアは 1-hop の通信範囲内にとどまる。一方、車両ネットワークでは車車間通信を利用したマルチホップな情報伝搬が行えるため、より広範囲の情報収集が可能となる。しかしながら、このようなアプリケーションを安定的にサポートするためには、通信トラフィックの抑制と高いパケット到達性を実現するルーティングプロトコルが必要となる。

車両ネットワークでは、ノードのモビリティや建物の存在を考慮する必要があり、典型的なルーティング手法 [2], [3] ではネットワークトポロジの変動が課題とされてきた [4]。この課題に対し、よりロバスト性の高い手法として、受信車両ベースのパケット中継アプローチが提案されている [5], [6], [7], [8], [9]。これらの手法では、冗長な中継パケットの削減による通信トラフィックの抑制と、都市環境におけるパケット到達性の向上に焦点が当てられているものが多い。しかしながら、従来のアプローチは現実の道路環境への適用に対する検討が不十分であると考えられる。実道路環境では複雑な道路網構造や車両分布の偏りが課題となるため、既存のプロトコルを複雑な道路環境に適用した場合、行き止まりや迂回が必要なエリアがネットワーク上で発生し、パケット中継が途切れる可能性が高くなる。パケット到達性を確保するために中継パケットを増加させると、通信トラフィックの増大により帯域圧迫やパケット衝突が発生するおそれがあるため、通信トラフィックの増加を抑制しながらパケット到達性を改善するアプローチが必要となる。

そこで本論文では、道路網構造を考慮したジオルーティング手法 SRS (Source routing protocol based on Road network Structure) を提案する。SRS では、道路網構造に基づいた道路セグメント単位の通信経路を算出し [10]、行き止まりの経路や迂回が必要な経路を回避したパケット中継を行う。また、車両が存在しない経路を中継車両が検知し、動的に経路修復を行うことでパケットの到達性を向上させる。シミュレーション評価では、パケット到着率、総送信パケット数の観点から SRS の有用性を示す。

以下、2 章で車両ネットワークにおけるルーティングプロトコルについて述べ、その課題について検討する。次いで、3 章で道路網構造に基づくジオルーティング手法を提案する。4 章では、シミュレーションを用いた評価により

提案手法の特性および有効性を確認する。最後に 5 章で結論を述べる。

2. 関連研究

車両ネットワークのルーティングプロトコルは、パケット中継におけるアプローチの観点から、送信車両が中継車両を選択する送信車両ベースのアプローチと、受信車両が自律的に中継判断を行う受信車両ベースのアプローチの 2 つに大別される [4]。

2.1 送信車両ベースの中継アプローチ

送信車両ベースのアプローチは、周期的に送信するビーコンを利用して隣接車両を把握し、次ホップの中継車両を選択する手法である。GPSR [2] では、宛先に最も近いノードを中継ノードとして選択する Greedy Forwarding が提案されている。より宛先に近い隣接ノードに中継させることで、宛先までのホップ数を削減することが可能となる。また、都市環境に対応するために、交差点を考慮したパケット中継と経路修復を行う GPCR [3] も提案されている。送信車両が次ホップの中継車両を指定するこれらの手法では、不要なパケット中継が少なく、通信トラフィックの抑制が期待できる。しかしながら、車両ネットワークではモビリティや建物の影響により車両のトポロジが時間とともに大きく変動するため、周期的なビーコン情報に依存する送信車両ベースのアプローチは動作しない場合がある。

2.2 受信車両ベースの中継アプローチ

受信車両ベースの中継アプローチでは、受信車両が条件に基づいて自律的に中継判断を行う。本アプローチは、受信車両が自身の条件のみに基づいて中継の可否を決定する手法 [5], [6] と、Contention-Based Forwarding (CBF) を用いて協調的な中継判断を行う手法 [7], [8], [9] に分類できる。

LDB [5] では、送信車両より宛先に近い車両にのみ中継を許可し、不要なパケット拡散を抑制する Directional Flooding (DF) を利用している。また、DADCQ [6] では送信車両からの距離に基づいて中継判断を行う。隣接車両分布とチャンネル環境から閾値を決定し、送信車両からの距離が閾値を超える場合に中継を実行する。これらの手法は一定のブロードキャスト抑制効果が期待できるが、条件を満たすすべての車両が中継を実行するため、車両密度が高い環境では冗長な中継が行われる可能性が高い。

CBF を用いたアプローチでは、受信車両が一定時間バックオフを行い、バックオフの終了時に中継判断を行う。バックオフ中に他車両からの中継パケットを受信した場合は、自身が中継を行う必要はないと判断できる。このような分散的アクセス制御を利用した中継方式を CBF と呼び、その場のネットワーク状況に合わせた協調的なパケット中継

を実現する. IVG [7] では, 送信車両から遠い車両が優先的に中継を行う Distance Defer Time (DDT) スキーマを利用している. DDT では送信車両からの距離に反比例したバックオフ時間を設定するため, 送信車両から遠い車両ほどバックオフ時間が短くなる. また, 都市環境におけるパケット到達性を改善するため, 交差点上の車両に対して優先的なバックオフ時間を割り当てる手法も提案されている [8], [9]. これらの手法では分散的に Greedy Forwarding が実現できるため, 全体のホップ数削減につながるという利点がある. ただし, 送信車両は次の中継車両を指定しないため, 冗長な中継を完全に抑制することは困難であると考えられる. しかしながら, 受信車両がその場の状況に応じて中継判断を行うことができるため, 送信車両ベースのアプローチと比較してロバスト性が高い [4]. さらに, 受信車両ベースのアプローチはビーコン情報に依存しないため, ビーコンが利用できない環境でも動作可能であるという利点がある. したがって, 本論文では受信車両ベースの中継アプローチに焦点を当てる.

2.3 問題点

本論文では, 典型的なアプリケーションとして, 走行車両が特定の基地局に向けて走行情報を送信することを想定する. このアプリケーションを実現する受信車両ベースの中継アプローチを用いたベースラインプロトコルの例として, DF と DDT を組み合わせた手法が考えられる. DF と DDT を併用した場合, 基地局に向かう方向にパケットを伝搬させるとともに, Greedy Forwarding によりホップ数を削減できるため, パケット伝搬に要する通信トラフィックの抑制が期待できる. しかしながら, 上記の手法を現実の複雑な道路環境に適用した場合, 道路環境に起因する問題と中継車両のトポロジに起因する問題により, パケットの到達性が低下すると考えられる.

道路環境に起因する問題とは, 道路網構造や建物の影響によって生じる問題を指す. 現実の道路環境を想定した場合, パケット中継において迂回が必要な経路や行き止まりの経路がネットワーク上で発生する. また, 中継車両のトポロジに起因する問題として, デッドエンドやトラフィックホールが考えられる. デッドエンドとは, 通信可能な車両が周囲に存在せず, パケット中継において行き止まりとなる状態を指し, 車両密度が低いほど発生しやすい. さらに, 実道路環境では車両の交通流に偏りがあるため, 高車両密度の場合であっても車両が存在しない領域が部分的に生じる. このようなネットワーク上の穴をトラフィックホールと呼び, デッドエンドを招く要因となる.

図 1 に実道路環境におけるパケット中継シナリオの例を示す. 車両 A が基地局 R に向けて走行情報を送信する場合を例にあげると, 車両 A と基地局 R の間には建物が存在するため, 建物を迂回するように情報を中継する必要が

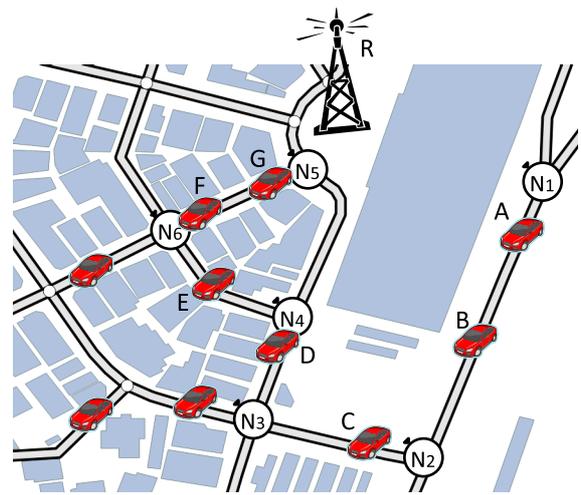


図 1 パケット送信シナリオの例

Fig. 1 Example of packet transmission scenario.

ある. このとき, 車両 B は車両 A からのパケットを受信するが, 車両 B は基地局より遠ざかる地点に位置するため中継は行わない. また, 車両 D がパケット中継を試みる場合を考えると, 車両 D においてデッドエンドが生じており, パケットの伝搬が交差点 N_4 付近で途絶える. このように, 実道路環境では道路環境と車両トポロジが原因となり, パケット到達性の低下が問題となる.

2.4 問題点に対するアプローチ

複雑な道路環境におけるパケット到達性を確保するために, 道路環境の問題と中継車両トポロジの問題それぞれに対処が必要である. 道路環境により生じる問題は, 交差点や道路のつながり, 建物の存在が原因となるため, 時間的な変化がなく静的な対処が可能である. したがって, 道路網構造を考慮した通信経路を構築し, 道路上に沿った情報伝搬を行うことが有効なアプローチであると考えられる. 一方, 中継車両トポロジの問題に対しては時間的な環境の変化を考慮する必要がある. 経路修復といった動的な対処が有効である. すなわち, 不規則に生じるトラフィックホールやデッドエンドの存在に対して, 中継車両がホップごとに動的に対応する必要がある. 中継車両がデッドエンドの存在を認識する方法として, ビーコンを用いた検知方法と, 中継パケットのオーバヒアを用いた検知方法が考えられるが, 本論文ではビーコンに依存することなくリアルタイムな検知が可能な後者のアプローチを選択する.

3. 提案

本章では, 道路網構造に基づくジオルーティング手法 SRS を提案する. SRS では, 送信車両による道路ベースの通信経路算出と中継車両による動的経路修復 [10] を利用したソースルーティングを行う.

3.1 提案概要

SRS では道路に沿ったパケット伝搬を実現するために、交差点の集合で通信経路を表現する。送信元の車両が道路に基づいて宛先までの通信経路を算出し、経路情報を格納したソースパケットを送信する。パケットを受信した車両のうち、通信経路に指定された道路上に位置する車両のみ中継車両の候補となり、中継バックオフを用いて自律的に中継判断を行う。以上のように、送信元の車両は通信経路を道路レベルで指定したソースルーティングを行い、通信経路上では受信車両が CBF を利用してパケットを中継する。本プロトコルは、各車両が位置情報および道路地図情報を利用できることが動作条件となる。本論文では、各車両は必要に応じて車載の GPS デバイスを利用して自車両の位置を取得可能であると想定し、すべての車両が共通の地図データをローカルに保持しているものとする。

3.2 通信経路の算出

ソースパケットの送信車両は、道路網構造に基づいて宛先までの通信経路を算出し、経路情報をパケットに格納して送信する。以下、通信経路の算出方法について述べる。ソースパケットを送信する車両は、地図データを参照して各交差点と道路セグメントの接続関係を把握したうえで、自身の直近の交差点から宛先地点までの最短経路を算出する。このとき、道路に沿って最短距離となる経路を計算するために、交差点をノード、道路セグメントをエッジとしたグラフに基づき、道路セグメント長をコストとしてダイクストラアルゴリズムを適用する。ここで得られた経路情報を交差点 ID のリストで表現し、自車両の位置情報とともにソースパケットに格納して送信する。図 1 において車両 A が基地局 R に向けて情報を送信する場合を例にとる。車両 A は直近の交差点 N_1 から N_5 までの最短経路を算出する。ダイクストラアルゴリズムによる計算の結果、車両 A は交差点 ID リスト $L_N = \{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5\}$ をパケットに格納し、宛先 R に向けて送信する。

このように、SRS では道路ベースの通信経路を活用することで、道路上に沿ったパケット中継を実現する。しかしながら、交差点 ID の集合で通信経路を指定するルーズソースルーティングであるため、送信車両は中継車両を一意に決定しない。したがって、受信車両が自律的に中継判断を行うためのパケット中継アルゴリズムが必要となる。

3.3 パケット中継アルゴリズム

データパケットを受信した各車両は、中継アルゴリズムに基づき中継を行うかどうかを決定する。中継アルゴリズムは、自身が中継車両の候補となるかを判断するフェーズと、パケット中継の候補となった車両が CBF に基づく中継を行うアクセス制御フェーズに分かれる。

図 2 に受信車両におけるパケット中継の流れを示す。ま

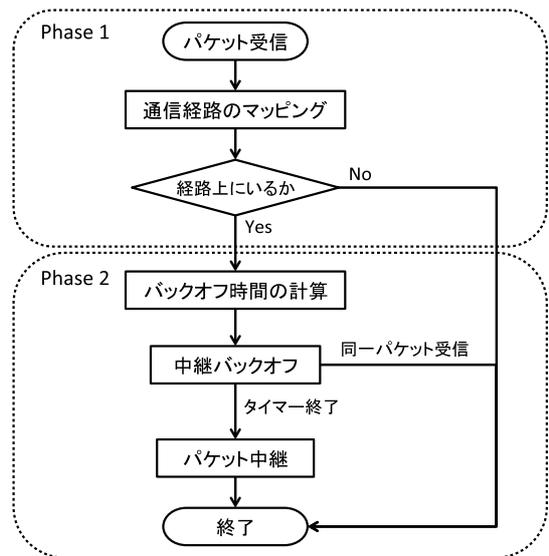


図 2 受信車両におけるパケット処理の流れ

Fig. 2 Flowchart of packet processing in receiver.

ず、受信車両はデータパケットに格納された交差点 ID リストと、自身が保有する地図データを照合する。地図データ中の交差点と道路の接続情報により、通信経路に含まれる道路セグメントの集合を把握する。この処理によって、受信車両自身の位置と、通信経路上の交差点および道路セグメントとのマッチングが可能となる。ここで、自身が通信経路上に位置すると判断した場合は中継車両の候補となり、バックオフを用いたアクセス制御フェーズに移行する。

アクセス制御フェーズでは、受信車両が自律分散的に中継判断を行うために中継バックオフを用いる。中継車両の候補となった各車両は、自身のバックオフ時間を計算しタイマを設定する。図 2 のように、バックオフ中に他車両のパケット中継が確認できた場合、自身は中継を行う必要がないと判断する。他車両の中継パケットを受信することなくタイマが終了した場合は、パケット中の送信車両の位置情報を自身のものに更新し、中継を実行する。また、バックオフを用いたアクセス制御では、バックオフ時間の大小によって中継順序の優先付けが可能となる。本プロトコルでは、文献 [7] と同様に送信車両からの距離に反比例したバックオフ時間を設定し、送信車両との距離に応じた優先付けを行う。送信車両との距離は、受信パケットに含まれる直前の送信車両の位置と、GPS から得た自車両の位置から算出する。車両 i からのパケットを受信した車両 j は、以下の式 (1) を用いてバックオフ時間 τ_j を決定する。

$$\tau_j = \tau_{max} \cdot \left(\frac{R - d_{ij}}{R} \right) \quad (1)$$

ここで、 τ_{max} は最大バックオフ時間であり、 d_{ij} は i, j 間の距離、 R は通信範囲を表している。式 (1) より、送信車両から遠い車両ほどバックオフ時間が短くなり、優先的に中継を行うことが可能になる。以上のように、CBF における優先付けを利用することで、送信車両から最も遠い

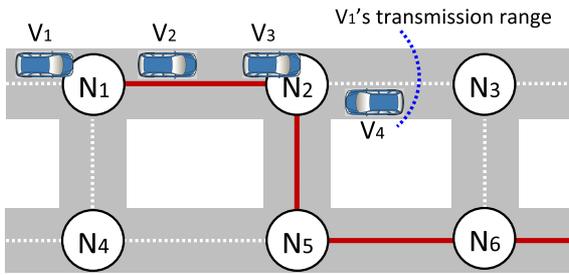


図 3 通信経路とパケット中継

Fig. 3 Routing path and packet forwarding.

車両が優先的に中継を実行する。その結果、自律分散的に Greedy Forwarding が実現され、全体のパケット中継回数を削減することが可能となる。

図 3 に通信経路とパケット中継の例を示す。ここでは、車両 V_1 が $L_N = \{N_1, N_2, N_5, N_6\}$ を指定してパケットを中継する場合を考える。車両 V_1 がパケットをブロードキャストすると、 V_1 の通信範囲内に位置する車両 V_2, V_3, V_4 がパケットを受信する。このとき、車両 V_2, V_3 はそれぞれ通信経路上に存在しているため、中継車両の候補となり次のフェーズに移行する。一方、車両 V_4 は交差点 N_2, N_3 間の道路セグメント上に位置するが、交差点 N_3 は通信経路に含まれないため、次のフェーズには移行せずパケットを破棄する。次に、車両 V_2, V_3 は式 (1) を用いて自身のバックオフ時間を計算し、中継バックオフに移行する。このとき、送信車両から遠くに位置する車両ほどタイムが短く設定されるため、車両 V_3 が車両 V_2 より先に中継を実行する。この結果、車両 V_2 は中継バックオフ中に車両 V_3 からの中継パケットを受信し、中継をキャンセルする。

3.4 経路修復

通信ノードのモビリティが大きい車両ネットワークでは、時間とともにネットワークポロジが大きく変化する。特に、実際の道路環境では車両分布に偏りが発生しやすいため、高車両密度の環境であっても通信範囲内に中継車両が存在しない場合が考えられる。これらの課題に対応するため、SRS では条件に基づき中継車両が動的に通信経路を再計算することで経路修復を行う。

(a) 経路修復の実行条件

SRS では、中継車両はパケット中継後に τ_{max} だけ待機し、その間に次ホップのパケット中継を確認できなかった場合、通信経路の再計算を行う。まず、パケットを中継した車両は、次ホップで他車両によるパケット中継が行われているかを τ_{max} の間監視する。パケット中継後、この間に次ホップの中継パケットが他車両によってブロードキャストされたことが確認できた場合、経路修復は行わない。一方、 τ_{max} が経過するまでに次ホップの中継パケットを受信しなかった場合、経路修復が必要であると判断する。

(b) 経路の再計算

経路修復が必要であると判断された場合、中継車両が宛先までの通信経路を再計算し、再ブロードキャストを行う。パケットを中継した車両がその後他車両からパケットを受信できなければ、中継車両より宛先に近い道路に通信可能な車両が存在しないと判断する。このとき、中継車両より宛先側の 1 つの道路セグメントを利用できないものとして扱い、除外道路 ID リストに追加する。通信経路の再計算時には、該当する道路セグメントを除いたうえで、宛先までの通信経路を算出する。また、中継ノードによって確認された除外道路セグメントの情報は、リストとしてデータパケットに格納され伝搬される。

図 1 において車両 A が基地局 R に向けて走行情報を送信する場合を例にとる。車両 A は宛先までの通信経路として交差点 ID リスト $L_N = \{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5\}$ を算出し、ソースパケットに格納して送信する。その後、車両 B, C, D の順にパケットが中継されるが、経路上に車両 D のブロードキャストを受信可能な車両は存在せず、車両 D は次ホップの中継パケットを検知しない。このとき、交差点 N_4, N_5 を結ぶ道路セグメントを除外道路 ID リストに追加する。車両 D は直近の交差点 N_4 を始点とし、 N_4, N_5 間の道路セグメントを除いたうえで、修復後の通信経路として $L'_N = \{N_4, N_6, N_5\}$ を算出する。このように、SRS ではオーバヒアを利用した送達確認と動的経路修復により、デッドエンドを回避しパケット到達性の向上をはかる。

4. シミュレーション評価

本論文では、シミュレーションを用いて提案手法 SRS の評価および考察を行う。

4.1 シミュレーション環境

提案手法の評価を実道路に近い環境で行うために、実際の道路地図データを利用し、通信シミュレータ Scenargie [11] と交通流シミュレータ SUMO [12] を統合したシミュレーション環境を構築した。道路データには日本デジタル道路地図協会が提供する全国デジタル道路地図データ [13] を、建物データには国土地理院発行の基盤地図情報 [14] を利用した。図 4、図 5 に、評価で用いる 2 種類の道路モデルを示す。図 4 は東京の銀座地区であり、格子状の単純な道路モデルの例として用いる。一方、図 5 は横浜市の日吉地区であり、複雑な道路モデルの例として利用する。銀座地区は直線道路が多く、格子状に近い道路網であるため単純な道路モデルとし、日吉地区は銀座地区と比較して曲線状の道路や行き止まりの箇所が多く、交差点の位置も不規則であることから、複雑な道路モデルの例とした。

車両のモビリティを上記の道路モデル上で再現するために、交通流シミュレータに道路地図データをインポートし

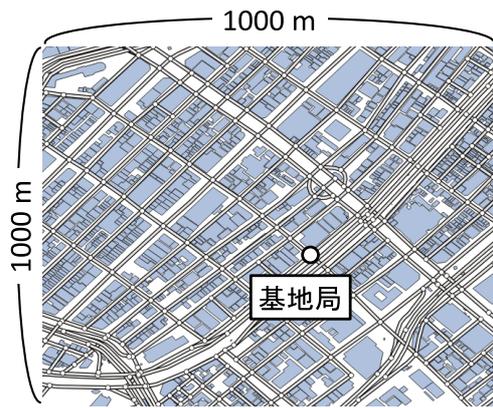


図 4 道路モデル 1: 東京都 銀座地区
Fig. 4 Road model 1: Ginza area in Tokyo.

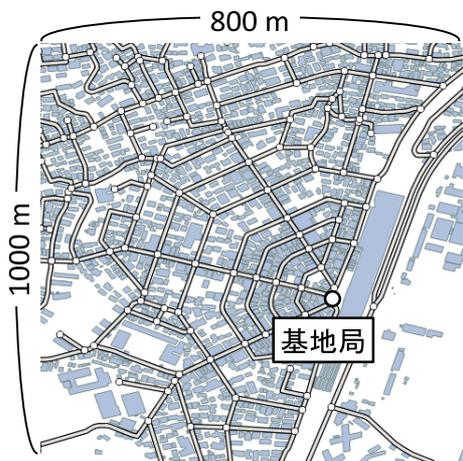


図 5 道路モデル 2: 横浜市 日吉地区
Fig. 5 Road model 2: Hiyoshi area in Yokohama.

てシミュレーションを行った。通信シミュレータに対しては、交通流シミュレータで出力されるモビリティトレースを入力し、建物を考慮した電波伝搬モデルとして ITU-R P.1411 [15] を利用した。以上のように、道路地図データ上で交通流を再現し、建物を考慮した電波伝搬計算を利用することで、より実環境に近い評価環境を構築した。

4.2 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。通信パラメータには、ITS シミュレーション標準シナリオ [16] で示されている標準的な値を用いた。車両台数 N_v およびソースパケット送信周期 T は評価によっては可変としたが、特に明示しない場合は表 1 の値を利用する。交通流シミュレーションでは、車両がランダムに出発地と目的地を設定し、最短経路を走行する。また、各車両は 60 km/h の制限速度内で、他車両の行動を考慮しながら加減速を行う。提案手法の評価にあたっては、各車両が一定周期 T ごとに走行情報を基地局に向けて送信するシナリオを用いる。今回は図 4、図 5 のように、シミュレーションエリア内に基地局を宛先として配置した。120 秒間の通信シミュレーションを 1 回

表 1 シミュレーションパラメータ
Table 1 Simulation parameters.

Communication	
Network simulator	Scenargie 1.6 [11]
Simulation time	120 s
Packet size	256 Bytes
Source packet interval T	30 s
Maximum backoff time τ_{max}	500 ms
PHY and MAC layer	802.11p
Data rate	6 Mbps
Band frequency	5.9 GHz
Bandwidth	10 MHz
Transmission power	20 dBm
Propagation model	ITU-R P.1411 [15]
Mobility	
Mobility simulator	SUMO 0.16.0 [12]
Number of vehicles N_v	1,000 vehicles
Number of lanes	2 (bi-directional)
Maximum velocity	60 km/h

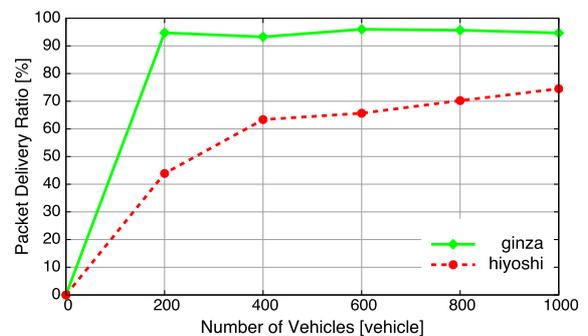


図 6 DF+DDT 方式のパケット到着率 (道路モデルによる比較)
Fig. 6 PDR versus number of vehicles in different road models.

の試行とし、5 回の試行の平均値を評価結果の値として用いた。ただし、シミュレーション時間 120 秒のうち、開始後と終了前の 10 秒は評価の対象から除外する。

提案手法 SRS の評価では、DF と DDT を併用した手法 (DF+DDT) をベースラインプロトコルとし、比較評価を行う。評価指標にはパケット到着率と総送信パケット数を用いる。パケット到着率は、各車両が生成したソースパケット数に対する、基地局が受信したパケット数の割合である。総送信パケット数はソースパケットと中継パケットを含み、1 秒あたりに送信されたパケット数で定義される。

4.3 道路モデルに対する特性評価

道路網構造による影響を評価するため、銀座地区と日吉地区の道路において DF+DDT 方式を評価する。ここでは、各車両が 30 秒周期でソースパケットを送信するシナリオを利用した。図 6 に、銀座地区と日吉地区における車両台数 N_v とパケット到着率の関係を示す。図 6 から、銀座地区におけるパケット到着率は車両台数にかかわらず 90% 以上の到着率を達成していることが分かる。一方、日吉地区

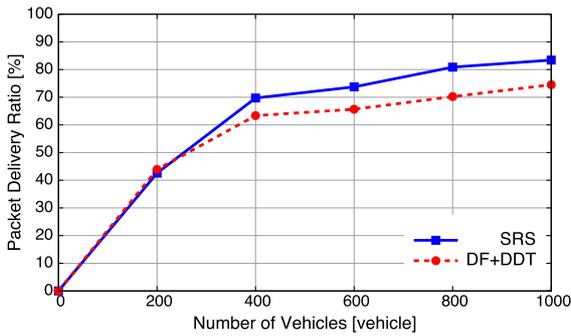


図 7 車両台数 N_v に対するパケット到着率
Fig. 7 PDR versus number of vehicles N_v .

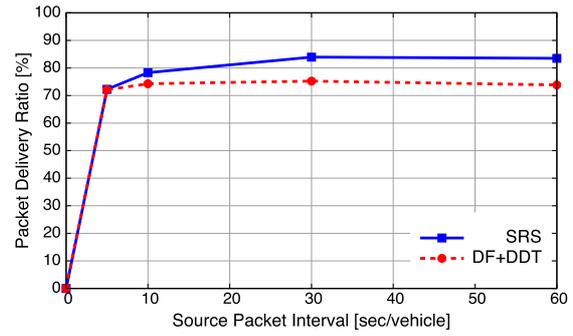


図 8 ソースパケット送信周期 T に対するパケット到着率
Fig. 8 PDR versus source packet interval T .

ではパケット到着率の低下がみられ、車両台数が1,000台の場合でも80%未満にとどまっている。日吉地区では、入り組んだ道路環境や交通流の偏りが原因となり、行き止まりの経路や迂回が必要な経路が発生しやすいと考えられる。したがって、日吉地区では車両台数が増加してもパケット到着率が向上しにくく、高車両密度の場合でもパケット到着率が不十分である。以上の結果から、DF+DDTを用いた場合、複雑な道路環境ではパケット到着率の低下が問題となることが確認された。

4.4 日吉地区におけるシミュレーション結果

ここでは、日吉地区における提案手法 SRS の通信特性を評価する。パケット到着率と総送信パケット数の指標において、DF+DDT 方式との比較評価を行う。

(a) パケット到着率

図 7 に日吉地区における車両台数 N_v に対するパケット到着率の比較を示す。各車両のソースパケット送信周期 T は 30 秒とした。図 7 より、SRS は DF+DDT と比較してパケット到着率を最大で約 10% 改善している。図 9、図 10 について後に述べるような理由から、全体のパケット到着率が向上したといえる。また、高車両密度下では隣接車両数が増加することに加え、渋滞が発生しやすく車両トポロジが変化しにくいと考えられる。したがって、車両台数が増加するとネットワークのコネクティビティが向上し、パケット到着率が改善される。しかし、車両台数が 200 台のような低車両密度の場合、SRS によるパケット到着率の改善はみられない。車両密度が極端に低いと経路修復が機能せず、プロトコルに限界が生じていることが分かる。低車両密度における到達性を改善するためには、受信パケットを一時的に保持し他車両との遭遇時に中継を行う Carry-and-Forward など、Delay Tolerant Network (DTN) に関するアプローチが必要となる。

図 8 はソースパケット送信周期 T に対するパケット到着率であり、通信負荷に対するパケット到達性の比較評価を表している。図 8 より、SRS はソースパケット送信周期が 30 秒、60 秒の場合に 80% 以上のパケット到着率を示し

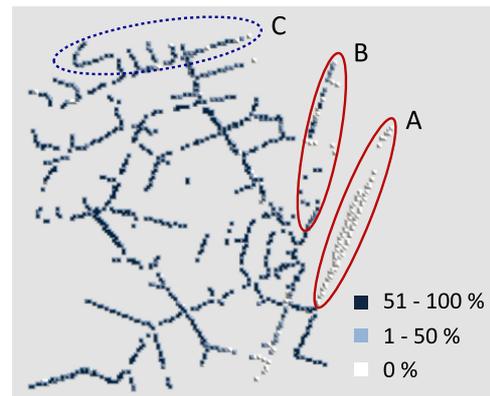


図 9 パケット生成地点ごとの到着率 (DF+DDT)
Fig. 9 Geographical distribution of PDR in DF+DDT.

ている。パケット送信周期が短いほどパケット到着率の低下がみられるが、通信要求の増加により帯域圧迫やパケット衝突が発生していることが要因であると考えられる。特に、パケット生成周期が 5 秒の場合、SRS は DF+DDT と同程度の値にとどまっている。通信要求の増加にともなってパケットロスが増加すると、SRS では経路修復が実行され通信要求がさらに増加するため、通信負荷が高い環境では性能が低下してしまうと考えられる。

(b) パケット生成地点ごとの到着率による地理的分析

SRS, DF+DDT におけるパケット到着率の差異を考察するために、図 5 の日吉地区におけるパケット到着率をパケット生成地点ごとに地図上に示し、地理的な特性を評価する。パケット生成地点ごとの到着率は、日吉地区を 5m のメッシュに分割し、各地点で生成・送信されたソースパケットの基地局における到着率をプロットの濃淡で表したものである。ここでは、車両台数 N_v を 800 台、ソースパケット送信周期 T を 30 秒とした。

図 9 に DF+DDT のパケット到着率を、図 10 に SRS のパケット到着率を、それぞれパケット生成地点ごとに示す。図 9 より、DF+DDT では領域 A, B において、パケット到着率が低いことを示す白いプロットが確認できる。日吉地区では道路環境や車両トポロジが問題となるため、特定の領域からのパケットが到達せず、パケット到着

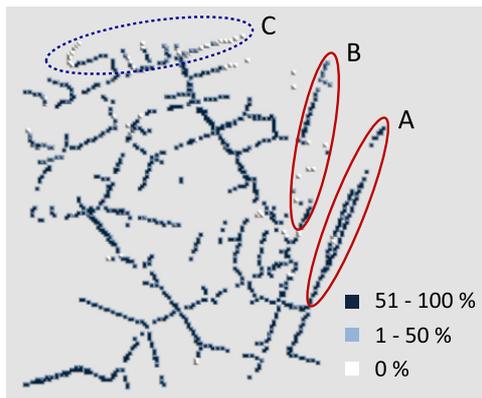


図 10 パケット生成地点ごとの到着率 (SRS)

Fig. 10 Geographical distribution of PDR in SRS.

率の値に地理的な偏りが生じている。DF+DDT では基地局から遠ざかる方向に中継しないため、領域 A のような迂回が必要な領域からのパケットが到達しないことが分かる。一方、図 10 では、図 9 でパケット到着率が低かった領域 A, B においてパケット到着率の改善がみられる。特に領域 A では、生成されたパケットが道路に沿って建物を回り込むように中継されていくため、DF+DDT では到達しなかった地点からの到着率が向上している。SRS における道路ベースの通信経路算出や経路修復のアプローチが、パケット到着率の改善につながったと考えられる。

しかしながら、図 10 において、図 9 と比較して白くなっているプロットが領域 C を中心に確認でき、SRS の性能低下がみられる部分がある。SRS では経路修復を行うものの、パケットが道路上に沿って伝搬するという制限があり、代替となる経路が存在しない場合はパケットの中継が途絶える。したがって、領域 C などのシミュレーションエリアの端の領域では、伝搬経路が複数存在しないために経路を修復できず、パケット到着率が低下したと考えられる。

日吉地区のように複雑な道路モデルでは、基地局の配置位置がパケット到達率に影響を及ぼす可能性がある。DF+DDT は道路環境による影響を受けやすく、基地局周辺の道路網構造によってパケット到達率に差が生じると予想される。一方、SRS では道路に沿ったパケット中継を行うため、到達性低下の一因である道路網構造の問題に対応でき、DF+DDT と比較して基地局の配置位置による影響は小さくなると考えられる。

(c) 総送信パケット数

図 11 は車両台数 N_v に対する総送信パケット数の比較評価である。総送信パケット数は、シミュレーション全体で 1 秒あたりに送信・中継された合計のパケット数で定義される。図 11 より、車両台数が 600 台以上の場合、SRS は DF+DDT より少ない送信パケット数を示している。図 7 ではパケット到着率の改善が確認できたため、車両密度が一定以上の場合、SRS は DF+DDT と比較して効率的な

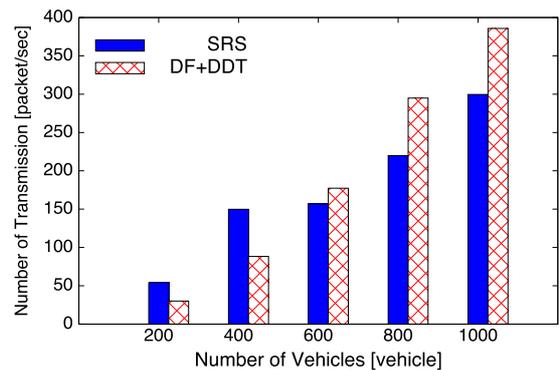


図 11 車両台数 N_v に対する総送信パケット数

Fig. 11 Number of transmissions versus number of vehicles N_v .

パケット中継が可能であるといえる。SRS では中継車両の候補を道路セグメント単位で絞り込むため、中継車両が限定されパケット中継数が抑制されたと考えられる。経路修復による中継パケットの増加も考えられるが、高車両密度の場合は経路修復の発生が少ないため、経路修復によるパケット増加の影響は小さい。車両台数が 400 台の場合、SRS は経路修復によって DF+DDT よりパケット送信数が多くなっているものの、先に述べたようにパケット到着率では改善を確認している。ただし、車両台数が 200 台のような低車両密度下では、経路修復を行っても基地局まで情報を伝搬できない可能性が高いため、送信パケット数が増加してもパケット到着率の改善にはつながっていない。

5. おわりに

本論文では、道路網構造に基づくジオルーティング手法 SRS を提案した。SRS では、宛先までの通信経路を道路ベースで算出することで、道路に沿ったパケット中継を実現する。さらに、中継車両による動的な経路修復により、低車両密度時のパケット到着率を改善する。デジタル地図上で交通流を再現したシミュレーション環境を構築し、既存方式を評価した結果、複雑な道路モデルではパケット到着率の低下が問題となることを確認した。日吉地区におけるパケット到着率の比較では、提案手法 SRS が既存方式と比較してパケット到着率を最大で約 10% 改善した。総送信パケット数の評価では、低車両密度の場合を除き、SRS が中継パケット数を抑制できることを確認した。以上の評価結果より、SRS は通信トラフィックの増加を抑制しながらパケット到達性を改善できることが分かった。しかし、低車両密度の環境では十分なパケット到着率を得られていないといえないため、今後は Carry-and-Forward をはじめとする DTN アプローチの検討が必要となる。

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。また、一般財団法人日本デジタル道路地図協会から全国デジタル道路地図研究用データをご提供いただきました。

参考文献

- [1] 国土交通省道路局: ITS スポット (オンライン), 入手先 http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/spot_dsrc/index.html (参照 2014-05-05).
- [2] Karp, B. and Kung, H.T.: GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks, *Proc. ACM MobiCom'00*, pp.243-254 (2000).
- [3] Lochert, C., Mauve, M., Fussler, H. and Hartenstein, H.: Geographic Routing in City Scenarios, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol.9, No.1, pp.69-72 (2005).
- [4] Hartenstein, H. and Laberteaux, K.P.: A tutorial survey on vehicular ad hoc networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol.46, No.6, pp.164-171 (2008).
- [5] Chou, L. and Yang, Y.: Location-Based Directional Broadcast for Inter-Vehicle Communications, *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Fall)*, pp.1-5 (2010).
- [6] Slavik, M. and Mahgou, I.: Spatial Distribution and Channel Quality Adaptive Protocol for Multihop Wireless Broadcast Routing in VANET, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.12, No.4, pp.722-734 (2013).
- [7] Bachir, A. and Benslimane, A.: A multicast protocol in ad hoc networks: inter-vehicle geocast, *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Spring)*, pp.2456-2460 (2003).
- [8] 赤松諒介, 鈴木理基, 岡本卓也, 原紘一郎, 重野 寛: 都市環境 VANET における交差点を考慮した Geocast 手法の検討, 情報処理学会研究会報告, Vol.2013-ITS-53, No.4, pp.1-8 (2013).
- [9] Akamatsu, R., Suzuki, M., Okamoto, T., Hara, K. and Shigeno, H.: Adaptive Delay-based Geocast Protocol for Data Dissemination in Urban VANET, *Proc. International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2014)*, pp.141-146 (2014).
- [10] 原紘一郎, 赤松諒介, 小原啓志, 重野 寛: VANET における道路網構造に基づく経路算出によるソースルーティング手法, 情報処理学会研究会報告, Vol.2014-ITS-56, No.8, pp.1-8 (2014).
- [11] 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, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム, pp.233-234 (2008).
- [12] Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M. and Bieker, L.: Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility, *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, Vol.5, No.3&4, pp.128-138 (2012).
- [13] 一般財団法人日本デジタル道路地図協会: デジタル道路地図 (オンライン), 入手先 (<http://www.drm.jp/index.html>) (参照 2014-05-05).
- [14] 国土地理院: 基盤地図情報とは (オンライン), 入手先 (<http://www.gsi.go.jp/kiban/towa.html>) (参照 2014-05-05).
- [15] ITU-R P.1411-5: Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz (2007).
- [16] 財団法人日本自動車研究所: ITS 通信シミュレーション評価シナリオ (Ver. 1.2) (オンライン) (2013), 入手先 ([http://www.jari.or.jp/Portals/0/resource/pdf/H23_simyu/ \(Ver1.2\) 20131010.pdf](http://www.jari.or.jp/Portals/0/resource/pdf/H23_simyu/ (Ver1.2) 20131010.pdf)) (参照 2014-05-05).



赤松 諒介 (学生会員)

2013 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在, 同大学大学院理工学研究科前期博士課程在学中。ITS の研究に従事。



小原 啓志 (学生会員)

2014 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在, 同大学大学院理工学研究科前期博士課程在学中。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)。情報処理学会学術誌編集委員, 同高度交通システム研究会幹事等を歴任。現在, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会主査, 電子情報通信学会英文論文誌 B 編集委員, Vice Chair of IEEE ComSoc APB TAC。ネットワーク・プロトコル, ITS 等の研究に従事。著書『ユビキタスコンピューティング』(オーム社), 『情報学基礎第 2 版』(共立出版) 等。電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員。