Vol.2014-MBL-73 No.25
Vol.2014-ITS-59 No.25
2014/11/21

車両ネットワークにおける 道路適応型ジオルーティング手法の検討

赤松 諒介[1,a)]　小原 啓志[1,b)]　重野 寛[1,c)]

概要：車両ネットワークにおけるジオルーティング手法は，位置情報の活用によって特定の地理的宛先に対する効率的なメッセージ配送を実現する．車両ネットワークの実用化に向け，より現実的な道路環境下での通信を想定すると，道路トポロジの複雑さや交通流の偏りが要因となり，ネットワークトポロジが激しく変動すると考えられる．したがって，通信ノードのトポロジに依存する従来のプロトコルでは，実道路環境において到達性の低下やオーバーヘッドの増加といった性能低下が生じると予想される．本稿では，道路ベースの中継アプローチを用いた道路環境適応型のジオルーティング手法を提案する．通信ノードを中心とした従来の方式とは異なり，道路を中心にとらえた中継アプローチを導入することで，周囲の道路環境に適応したロバストなルーティングを実現する．シミュレーション評価では，実在の道路地図を利用した通信シミュレーション環境を構築し，提案手法の性能および特性を評価する．

1. はじめに

車両アドホックネットワーク (Vehicular Ad Hoc Networks; VANET) では，車車間および路車間のアドホック通信を利用し，リアルタイム性と柔軟性をもつネットワークを構築する．中でも，車両間の効率的なマルチホップ通信を可能にするルーティングプロトコルは，多様な VANET アプリケーションを実現する要素技術として広く研究が行われている．特定の地理的な宛先地点に対するメッセージ配送を提供するジオルーティング (Geographic Routing) は，位置ベースルーティングとも呼ばれ，車両間のマルチホップ通信と位置情報の利用によってインフラレスに実現される [1]．宛先が地理的な位置であるという性質から，ジオルーティングプロトコルを利用することで位置依存性の高いアプリケーションを効率的にサポートすることが期待される．位置依存性のアプリケーションの例として，走行車両による広範囲のセンシング情報を，基地局がリアルタイムに収集するアプリケーションが挙げられる．

VANET におけるルーティングプロトコルでは，どの通信ノードがパケット中継行うか決定するためのパケット中継アプローチが重要である [1]．従来のプロトコルは，中継アプローチの観点から送信車両ベース手法と受信車両ベース手法の 2 つに大別される．送信車両ベースのアプローチでは，送信車両が次ホップの中継車両を隣接車両の中から選択し指定する．受信車両ベースのアプローチは受信車両が自律的に中継判断を行うもので，待ち時間による競合制御を行う Contention-Based Forwarding (CBF) に基づく手法が一般的である [2]．

VANET の特徴として，通信ノードが道路上に沿って高速のモビリティパターンで移動することが挙げられる．加えて，都市部では建物などの電波障害物によって電波伝搬が道路上に制限されやすい．このような環境ではネットワークトポロジが時間とともに大きく変動するため，周囲車両のトポロジ情報に大きく依存する従来の送信車両ベース手法の性能低下が指摘されている [2]．受信車両ベース手法では，受信車両がその場の状況に基づいて中継判断を行うためロバスト性は高い．一方で，冗長な中継が発生しやすいため，オーバーヘッドが大きいという課題がある．

現在の VANET の研究段階では，現実の通信環境に適用可能なプロトコルが必要となってきたが，実環境を想定したプロトコルに関する検討はまだ十分になされていない．実環境では，複雑な道路トポロジや車両分布の偏り，不規則な建物配置などから，時間とともに周囲の通信環境が大きく変化する．したがって，従来のルーティングプロトコルを実環境に適用した場合，複雑なネットワークトポロジの変動や偏りによるパケット到達性の低下が課題となると考えられる．到達性を確保するために単純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

[1] 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University
[a)] akamatsu@mos.ics.keio.ac.jp
[b)] obara@mos.ics.keio.ac.jp
[c)] shigeno@mos.ics.keio.ac.jp

© 2014 Information Processing Society of Japan

迫やパケット衝突を招くおそれがある．したがって，オーバーヘッドの増加を抑制しつつパケット到達性を改善するアプローチが必要である．

本稿では，道路トポロジ情報を利用した道路適応型ジオルーティング手法を提案する．本提案では，従来のノード中心の中継アプローチとは異なり，道路を中心にとらえたRoad-Centric アプローチに基づいたパケット中継を行う．送信車両による道路セグメント指定と，受信車両における自律的中継判断を統合した中継アルゴリズムを導入し，道路セグメント単位での中継を実現する．Road-Centric アプローチの観点のもと，効率性をもつ送信車両ベースのアプローチと，ロバスト性をもつ受信車両ベースのアプローチを統合し，高い到達性と効率性の両立を目指す．

以下，2 章で VANET におけるルーティングプロトコルについて述べるとともに，実道路環境における課題について検討する．次いで，3 章で Road-Centric アプローチ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

2.1 送信車両ベース手法

送信車両ベース手法は，送信車両が次ホップの中継車両を指定する中継アプローチである．各車両が周期的に送信するビーコンを用いて，送信車両が隣接車両の位置を把握し，次ホップの中継車両を選択する．GPSR [3] は，送信車両ベースの代表的なジオルーティング手法として知られている．GPSR では，隣接車両の中で最も宛先に近い車両を中継車両として選択する Greedy Forwarding を導入している．GPSR は自由空間において高い通信性能を示すが，都市部など電波障害物が多い環境には適さないことが指摘されている．GPCR [4] は，GPSR を都市環境向けに改良したもので，交差点付近の車両が中心となって中継を行うことで GPSR の課題を克服している．CAR [5] では，位置情報だけでなく経路ごとのコネクティビティ情報を管理することで，より安定した通信経路の確立を実現している．

2.2 受信車両ベース手法

受信車両ベース手法は，受信車両が周囲の状況や条件に基づき，中継を行うかどうかを自律的に判断する中継アプローチである．カウンタ型フラッディング (Counter-Based Flooding) [6] では，受信車両がランダムな中継待ち時間を設定し，タイマ終了時に中継判断が行われる．このとき，カウンタ閾値を超えるパケットを他車両から受信していた場合は，自身が中継を行う必要はないと判断して中継をキャンセルする．すなわち，待機が終了した時点で他車両からの中継パケットを一定数受信しなかった場合のみ中継を行う．このような待ち時間による競合を利用した中継制御は Contention-Based Forwarding (CBF) と呼ばれ，多くの受信車両ベースのアプローチで利用されている [2]．IVG [7] は高速道路シナリオを想定したプロトコルで，送信車両からの距離に応じた待ち時間を利用している．送信車両から遠い車両ほど待ち時間を短くすることで，ホップ数と伝搬遅延の抑制を可能にしている．UGAD [8] は，都市環境において交差点での中継が重要であることから，交差点上の車両を優先した待ち時間を提案している．交差点上の車両に短い待ち時間を与えることで，交差点で中継が行われる割合を高め，都市環境における到達性を改善している．

2.3 道路トポロジに基づく中継アプローチ

SRS [9] は，送信元車両が宛先までの通信経路を指定し，道路上に沿った中継を行うソースルーティングを行う．送信元車両は，道路トポロジをグラフ化して宛先までの最短距離経路を算出し，中継を行う経路を指定する．指定された道路上に位置する車両のみがカウンタ型フラッディングを行うとともに，送信車両からの距離に応じた待ち時間によってオーバーヘッドを抑制している．TrafRoute [10] は，道路に沿ってパケット中継の目印となる地点（ランドマーク）を設ける Forwarding Point (FP) の概念を導入している．送信元の車両があらかじめ FP を選択し，受信車両は各 FP との位置関係を考慮して自律的に中継判断を行う．これらの手法は，ともに道路情報を活用することで，送信元車両が通信経路をある程度の粒度で決定するルーズソースルーティングのアプローチをとっている．

2.4 実道路環境における課題

実道路環境では，複雑な道路トポロジや建物による不規則な電波伝搬，車両分布の偏りなどが要因となり，ネットワークトポロジが時間とともに大きく変化する．送信車両ベースのアプローチでは，送信車両によって中継車両が一意に決定されるため，不要な中継が生じにくくオーバーヘッドは小さい．しかし，車両トポロジが大きく変化する環境では，周期的なビーコン情報と実際の状況が異なる可能性が大きい．したがって，車両トポロジ情報に依存する送信車両ベース手法は，実道路環境において到達性の低下が課題となる．受信車両ベースのアプローチは，受信車両がその場の状況に従って判断するため，トポロジの変動に対するロバスト性が高い．一方で，各車両が自律的に振る舞いを決定するため，メッセージが広範囲に拡散しやすく冗長な中継が増大するという問題点がある．したがって，パケット到達性とオーバーヘッドの間に一定のトレードオフが存在すると考えられる．また，現実の環境では多様な道路モデルが存在し，道路地図によってプロトコルの通信性能が大きく影響を受けることが指摘されている [11]．実環境に適用することを想定すると，周囲の道路環境に適応したロバスト性の高いプロトコルが求められる．

© 2014 Information Processing Society of Japan

Vol.2014-MBL-73 No.25
Vol.2014-ITS-59 No.25
2014/11/21

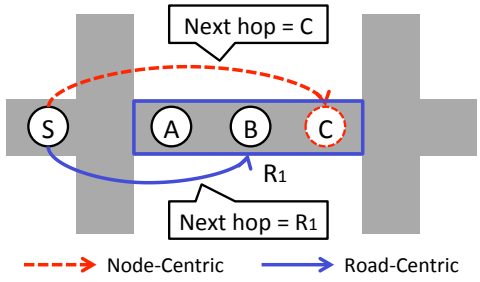


図 1　2 つの中継アプローチの比較

3. 提案

本章では，道路トポロジ情報を利用した中継アプローチに基づく道路適応型ジオルーティング手法を提案する．

3.1 Road-Centric アプローチ

本プロトコルでは，通信ノードを中心とした従来の中継方式（Node-Centric アプローチ）とは異なり，道路を中心に捉えた道路ベースの中継方式（Road-Centric アプローチ）を提案する．図 1 に，それぞれの中継アプローチの例を示す．通信ノード主体の Node-Centric アプローチでは，通信経路は通信ノードの連続で表現され，送信車両は特定の中継ノードを指定する．一方，提案手法では，通信経路を道路レベルで指定する Road-Centric アプローチを導入する．送信車両は特定の中継車両を指定する代わりに中継道路セグメントを選択し，中継車両の絞り込みを行う．指定された道路セグメント上に位置する受信車両は，中継候補車両として扱われ，中継を実行する可能性がある．送信車両は中継道路セグメントを指定するため，中継車両は一意に決定されない．そこで，中継候補となった各車両は CBF スキーマを利用し，中継するか否かを自律的に判断する．このように，提案手法では送信車両による中継車両の絞り込みと，受信車両におけるその場の状況に応じた中継意思決定により，最終的な中継車両が決定される．

3.2 送信車両による中継道路セグメント選択

パケットを送信する車両は，次ホップで中継を行う道路セグメントを選択し，ルーティング情報としてパケットに格納する．なお，送信車両はメッセージの送信元車両と中継車両を含み，各ホップにおける送信者と定義する．次ホップの中継道路セグメントを決定するために，送信車両は各道路セグメントの優先度を評価する．パケットの到達性を高めるためには，宛先に対して近づく方向に中継するとともに，よりコネクティビティの高い経路を選択する必要があると考えられる．そこで，以下の 2 つの評価要素を考慮して各セグメントの優先度を算出する．

(1) 地理的スコア：宛先に対する地理的優先度
(2) 接続性スコア：車両のコネクティビティ優先度

評価対象の道路セグメントの地理的スコアは，道路セグメントから宛先までの距離に基づいて計算される．また，接続性スコアは，道路セグメント上に存在する車両密度をもとに算出される．したがって，宛先に対する距離が小さく，より多くの車両が存在する道路セグメントに対して高い優先度を与える．

送信車両による評価対象の道路セグメントのうち，最も高いスコアが得られた道路セグメントを 1 つ選択する．また，評価対象の道路セグメント集合は，送信車両が位置する道路セグメントと接続している道路セグメントの集合とし，道路トポロジ情報に基づいて決定される．送信車両は以下の式 (1) を用いて，道路セグメント集合 s に属する道路セグメント i に対する優先度スコアを算出する．

$$P_i = w\frac{d_i}{d_{capacity}} + (1-w)\frac{max_{j\in s}(D_j) - D_i}{max_{j\in s}(D_j)} \qquad (1)$$

d_i は道路セグメント i の車両密度であり，$d_{capacity}$ は車両密度の最大値を表している．D_i は，道路セグメントの 2 つの端点のうち宛先方向に向かうもの (End Point) から，宛先地点までの距離である．ここで，2 点間の距離は道路トポロジに基づき，ダイクストラアルゴリズムを用いて算出する．したがって，D_i は道路に沿った距離，すなわち 2 点間の最短経路長を表す．また，$max_{j\in s}(D_j)$ は，道路セグメント集合 s に属する各道路セグメント j の D_j の最大値である．このように，d_i と D_i を最大値によって正規化し，それぞれを地理的スコアおよび接続性スコアとする．w は重み付け係数であり，道路セグメントの地理的スコアと接続性スコアを重み付けすることで優先度 P_i を算出する．

3.3 受信車両による自律的中継制御

送信車両は次ホップの中継車両を道路レベルで指定するため，送信車両は中継車両を一意に決定しない．したがって，中継車両側で中継意思決定を行う必要があるため，CBF スキーマによる中継判断を利用する．図 2 に受信車両における中継意思決定の流れを示す．受信車両は受信パケットに含まれる道路セグメント情報を参照し，受信車両が位置する道路セグメントが指定されているかどうか確認する．ここで，送信車両が指定した道路セグメントに位置する場合は中継候補車両となり，CBF スキーマを利用した中継制御のフェーズに移行する．

中継車両の候補となった車両は，自身の中継待ち時間を算出してタイマを設定し，中継候補車両間で競合を行う．従来の CBF スキーマと同様に，中継待ちの間に他車両からの中継パケットを受信した場合，自身は中継を実行する必要がないと判断し，中継を中止する．待ち時間による競合では，設定する中継待ち時間が短いほど競合に勝利する可能性が高くなる．したがって，中継待ち時間の大小により，中継候補車両に対する優先付けが可能となる．本提

© 2014 Information Processing Society of Japan

Vol.2014-MBL-73 No.25
Vol.2014-ITS-59 No.25
2014/11/21

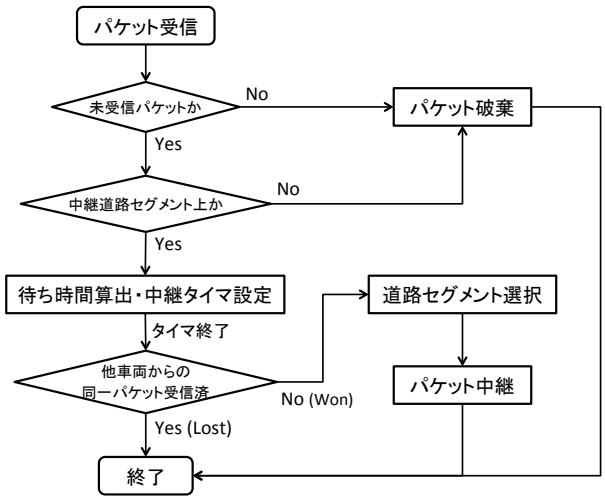


図 2　受信車両におけるパケット中継の流れ

案では，より宛先に近い車両が優先的に中継することで，ホップ数を削減し効率的なルーティングを実現する．中継の競合は同一の道路セグメント内で行われるため，道路セグメントの端点からの距離に応じた待ち時間を割り当てることで，ホップ数と伝搬遅延の抑制が可能となる．

送信車両 j からのパケットを受信した受信車両 i は，以下の式 (2) を用いて自身の中継待ち時間 τ_i を計算する．

$$\tau_i = \tau_{min} + \frac{D_{i,p}}{D_{j,p}}(\tau_{max} - \tau_{min}) \qquad (2)$$

τ_{min}, τ_{max} はそれぞれ最小待ち時間，最大待ち時間であり，CBF スキーマにおいて共通に利用されるパラメータである．p は道路セグメントの 2 つの端点のうち宛先側のものであり，宛先に近い交差点を意味する．また，$D_{i,p}$ は受信車両 i と端点 p 間の距離であり，$D_{j,p}$ は送信車両 j と端点 p 間の距離を表す．式 (2) により，端点 p に近い車両ほど短い待ち時間が割り当てられる．結果として，送信車両が選択した道路セグメントに位置する中継候補車両のうち，最も宛先に近い車両が優先的に中継を実行する．電波伝搬が道路上に制限されるような環境では，交差点上の車両がより多くの隣接車両をもつ性質がある．式 (2) では交差点からの距離に応じた待ち時間を設定するため，結果として交差点に近い車両が優先される．したがって，車両密度が大きい場合は，交差点上の車両を中心にパケットが中継されるため，効率的なルーティングが実現できる．

図 3 に受信車両における中継判断プロセスの一例を示す．図 3 は，送信車両 S が次ホップの中継道路セグメントとして R_1 を指定し，宛先方向に向けてパケットを中継した場合を表している．この例では，車両 S からのパケットを受信した車両 $A-G$ のうち，指定された道路セグメント R_1 上に位置する受信車両 $A-D$ が中継候補車両となる．中継候補車両 $A-D$ はそれぞれ自身の待ち時間を算出し，CBF スキーマを利用した中継判断を行う．このとき，道路セグメント R_1 の端点 p との距離が最も小さい車両 D が最

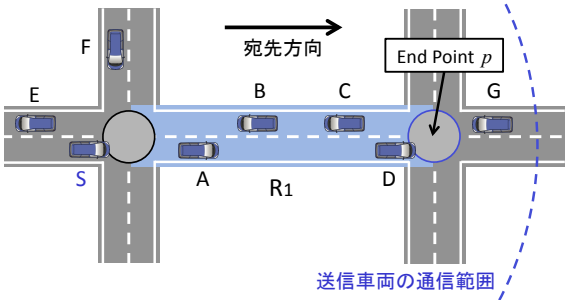


図 3　受信車両における中継プロセスの例

も短い待ち時間を得るため，車両 D が競合に勝利して中継を実行する．車両 D からの中継パケットを受信した車両 $A-C$ は中継をキャンセルする．

4. シミュレーション評価

4.1 シミュレーション環境

通信シミュレーションを用いて提案プロトコルの通信性能および特性を評価する．本稿では，より現実の環境を反映した評価を行うために，実在する都市部のデジタル地図を用いたシミュレーション環境を用意した．デジタル地図には，日本デジタル道路地図協会が提供する日本デジタル道路地図 [12] を利用し，基本道路モデルとして東京都浅草周辺の 800m × 1000m のデジタル地図を用いる（図 4(a)）．この地図上で，交通流シミュレータ SUMO [13] と通信シミュレータ Scenargie [14] を統合したシミュレーション環境を構築する．デジタル道路地図をインポートした SUMO を利用してモビリティトレースを生成し（図 4(b)），得られたトレースデータを変換して Scenargie に入力する．また，道路上に沿った電波伝搬を再現可能な ITU-R P.1411 [15] を電波伝搬モデルに用いることで，都市部における伝搬特性を考慮したシミュレーションを行う（図 4(c)）．

4.2 シミュレーション条件

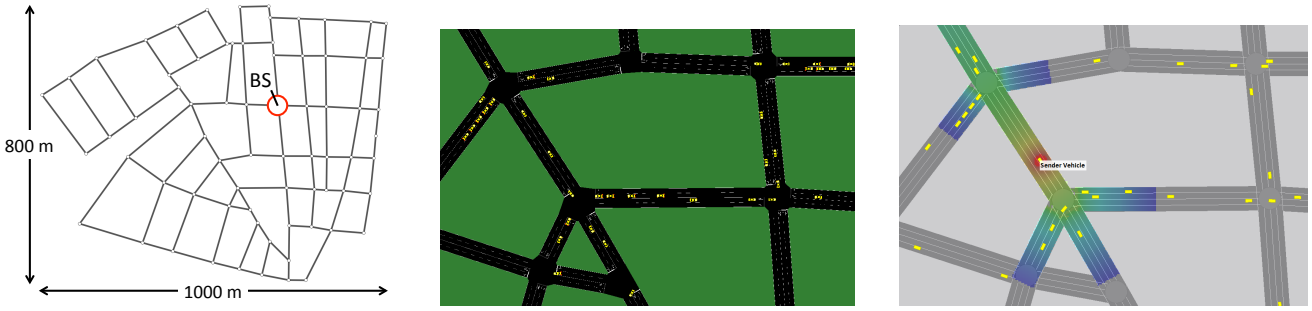
4.2.1 評価シナリオおよびシミュレーションパラメータ

主なシミュレーション条件を表 1 に示す．通信規格には車車間通信向け 5.9GHz 帯の IEEE 802.11p を利用する．通信パラメータの値は，ITS シミュレーション評価シナリオ [16] における標準的な値を採用する．電波伝搬モデルには ITU-R P.1411 を利用し，送信出力を 10dBm とした．このときの通信可能距離はおよそ 200m である．各車両はシミュレーションエリア内に流入後，ランダムに設定された目的地に向かって片側 2 車線の双方向道路を走行し，目的地に到着後に流出する．図 5 は，道路モデル 1 において車両流入量が 200 veh/min の場合の車両台数の時間推移を示している．このように，流入流出モデルではシミュレーションエリア内の車両台数が時間とともに変化する．

通信シナリオでは，道路上を走行する各車両が，周期的

© 2014 Information Processing Society of Japan

Vol.2014-MBL-73 No.25
Vol.2014-ITS-59 No.25
2014/11/21



(a) デジタル道路地図（道路モデル 1）　(b) 交通流シミュレーション　(c) 通信シミュレーションと電波伝搬

図 4　デジタル道路地図を用いた統合シミュレーション環境

表 1　シミュレーション条件

通信シミュレーション	
シミュレータ	Scenargie 1.7 [14]
通信規格	802.11p
変調方式	OFDM (BPSK 1/2)
送信出力	10 dBm
周波数帯	5.9 GHz
帯域幅	10 MHz
電波伝搬モデル	ITU-R P.1411 [15]
ビーコン送信周期	1 s
ビーコンサイズ	128 Bytes
データパケット送信周期	10 s
データパケットサイズ	500 Bytes
中継待ち時間 (τ_{max}, τ_{min})	(100 ms, 500 ms)
カウンタ閾値	2
重み付け係数 w	0.5
交通流シミュレーション	
シミュレータ	SUMO 0.21.0 [13]
車線モデル	片側 2 車線（双方向）
制限速度	50 km/h

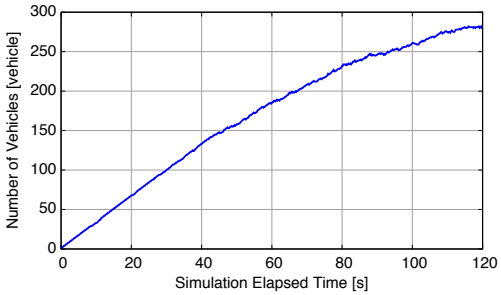


図 5　車両流入量 200 veh/min における車両台数の時間推移

に送信するビーコンパケットに加え，一定の間隔で基地局に向けてデータパケットを送信する．図 4(a) のように，基地局はシミュレーションエリア内に 1 つ設置され，各車両は基地局の位置を把握できるのもとする．車両が十分に流入するまでの時間を考慮し，車両を 60 秒間流入させた後，60 秒間の通信シミュレーションを行う．以上の条件で 5 回のシミュレーションを試行し，その平均値を評価する．

4.2.2　評価プロトコルおよび評価指標

提案手法に加えて, GPSR, Counter-Based Flooding (CB-Flooding), Shortest-Path Flooding (SP-Flooding) を評価し，比較と考察を行う．SP-Flooding は，CB-Flooding において中継を行う領域を特定の道路上に制限したものである．送信元車両があらかじめ宛先までの最短経路を算出し，中継道路を指定するソースルーティングである．

評価指標には以下のものを用いる．パケット到達率と冗長度は，それぞれ到達性と効率性を表す指標であり，定義は以下の式の通りである．

(a) パケット到達率 (Packet Delivery Ratio, PDR)
(b) 冗長度 (Redundancy)
(c) 伝搬遅延時間 (End-to-End Delay)

$$PDR = \frac{number\ of\ received\ packets\ in\ BS}{number\ of\ source\ packets}$$

$$Redundancy = \frac{total\ number\ of\ transmissions}{number\ of\ source\ packets}$$

4.3　シミュレーション結果

図 4(a) に示した道路モデル 1 において，提案手法および比較プロトコルの評価を行う．各プロトコルについて，車両流入量を変化させてシミュレーションを実行した．

(a) パケット到達率

図 6 に車両流入量に対するパケット到達率を示す．各プロトコルを比較すると，CB-Flooding が最も高い到達率を示しており，車両流入量が 250 veh/min の場合で 73%の到達率となっている．提案手法は車両流入量 250 veh/min において 65%にとどまっているが, 送信車両ベースのアプローチである GPSR や，車両トポロジを考慮しない SP-Flooding よりも高い到達率を示した．CB-Flooding ではすべての車両が中継を行う可能性があり，メッセージが広範囲に拡散しやすいため，提案手法よりも高い到達率を示したと考えられる．また，各プロトコルは車両流入量が増加するとともに到達率も増加するが，提案手法では車両流入量が 200 veh/min と 250 veh/min の場合の到達率が等しい．現段階の提案手法のアプローチでは中継道路セグメントを 1 つに制限しているため，一定の到達率を超えると車両が増加しても到達率が改善されにくい可能性がある．

© 2014 Information Processing Society of Japan

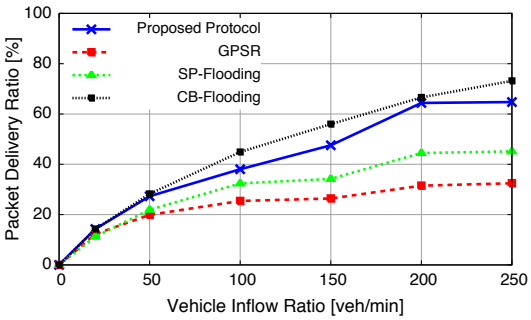


図 6　車両流入量とパケット到達率

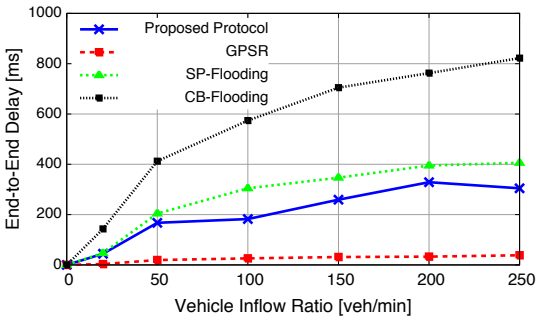


図 8　車両流入量と伝搬遅延時間

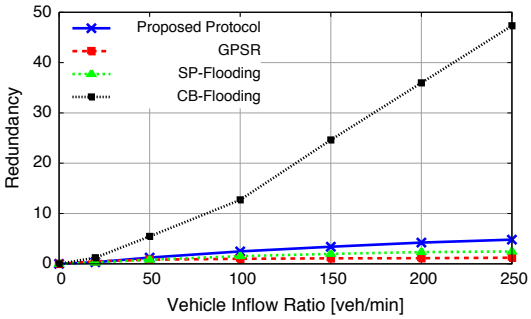


図 7　車両流入量と冗長度

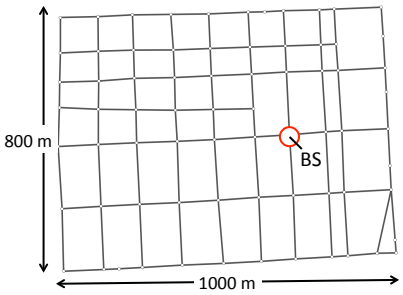


図 9　道路モデル 2

表 2　道路モデルパラメータ

パラメータ	道路モデル 1	道路モデル 2
交差点数	71	72
道路セグメント数	113	121
総道路長	11466 m	13776 m
平均道路セグメント長	101.47 m	113.85 m

(b) 冗長度

図 7 は車両流入量に対する冗長度を示している．冗長度の値は中継に要する全体のオーバーヘッドを表す．提案手法，GPSR，SP-Flooding は車両流入量が 250 veh/min の場合でも冗長度が 5 を下回っているのに対し，CB-Flooding は 47 と高い冗長度を示している．単純な受信車両ベースの CB-Flooding では，中継におけるオーバーヘッドが増大することがわかる．対照的に，送信車両ベースの手法である GPSR が最も低い冗長度となった．提案手法および SP-Flooding は CBF スキーマを利用しているにもかかわらず，CB-Flooding と比較して冗長度を大きく抑制している．したがって，道路セグメント指定による制限がオーバーヘッドを効果的に抑制したと考えられる．図 6 と図 7 の結果から，提案手法は低い冗長度を示した一方で，比較的高い到達率が得られることがわかり，他のプロトコルと比較して効率的であるといえる．しかしながら，提案手法が十分な到達率を達成しているとはいえず，今後は到達率のさらなる改善が課題となる．

(c) 伝搬遅延時間

図 8 に車両流入量に対する伝搬遅延時間を示す．伝搬遅延時間は，ソースパケットが送信されてから基地局に到達するまでに要した時間である．図 8 より，車両流入量が増加するとともに伝搬遅延時間が増加している．これは，車両が増加するにつれてコネクティビティが高まり，パケット到達率が高まったことで，エンドツーエンドの平均ホップ数が増加したためである．各プロトコルを比較すると，中継待ち時間を利用する 3 つのプロトコルは GPSR と比較して伝搬遅延が大きいことがわかる．CB-Flooding および SP-Flooding では，ともにランダムな待ち時間を設定するが，CB-Flooding は到達率が高いために平均ホップ数が多くなり，SP-Flooding よりも平均の伝搬遅延が大きくなっている．また，提案手法は距離に応じた待ち時間を設定するため，各ホップで要する待ち時間が小さくなり，伝搬遅延時間を 300 ms 以内に抑制できたと考えられる．

4.4　道路モデルに対する特性評価

道路適応型のルーティングを実現するために，道路モデルに対するロバスト性を検証する必要がある．ここでは，道路モデルに対する特性を評価するため，異なる道路地図を用いてプロトコルを評価する．

図 4(a) の道路モデル 1 に加えて，図 9 に示す道路モデル 2 を用いる．道路モデル 1 が不規則な道路トポロジであったのに対して，道路モデル 2 はグリッド状に近いモデルである．また，各道路モデルの道路パラメータは表 2 に示す通りである．交差点数，道路セグメント数は同程度であり，道路セグメント長の合計値は道路モデル 2 の方が大きい．これらの道路モデルにおいて，提案手法，CB-Flooding のパケット到達率および冗長度を評価した．シミュレーションシナリオは 4.2 節に示した通りである．

© 2014 Information Processing Society of Japan

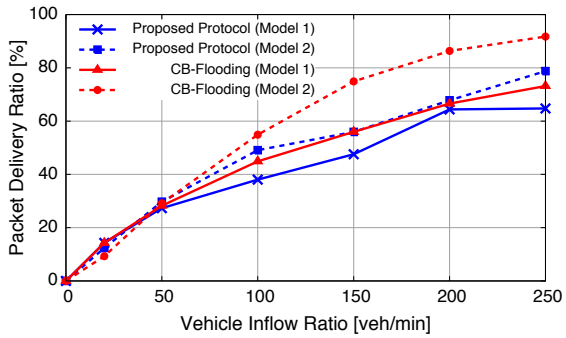


図 10　各道路モデルにおける車両流入量とパケット到達率

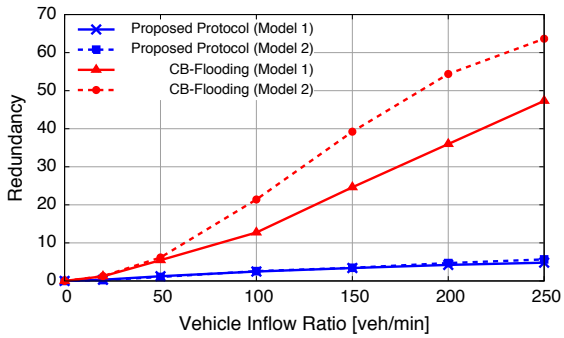


図 11　各道路モデルにおける車両流入量と冗長度

(a) 道路モデルとパケット到達率

図 10 に車両流入量に対する道路モデルごとのパケット到達率を示す．CB-Flooding，提案手法は道路モデル 2 において，車両流入量が 250 veh/min の場合にそれぞれ 92%, 79%のパケット到達率となった．また，提案手法，CB-Flooding ともに道路モデル 2 において道路モデル 1 よりも高い到達率を示した．道路モデル 2 は道路モデル 1 よりも道路セグメント長の合計値が大きく，同じ車両流入量であっても車両密度は小さくなる．しかし，道路モデル 2 はグリッド状の道路トポロジであるため見通しの得られる距離が長く，結果として高い到着率が得られたと考えられる．各プロトコルでモデル間の結果を比較すると，提案手法は CB-Flooding と比較してモデル間の到達率の差が小さいことがわかる．提案手法は到達率に課題が残るものの，道路モデルによって受ける影響を抑制可能であると考えられる．

(b) 道路モデルと冗長度

図 11 に車両流入量に対する道路モデルごとの冗長度を示す．各プロトコルにおいてモデル間の冗長度を比較すると，提案手法はモデル間での差が確認できないのに対し，CB-Flooding ではモデル間の冗長度の差が大きいことがわかる．車両流入量が 250 veh/min の場合では，CB-Flooding の冗長度は道路モデル 1 において 47，道路モデル 2 において 64 となった．道路モデル 2 のようなグリッド状の道路トポロジでは，見通し距離が長くなり隣接車両数が増加するが，提案手法では道路セグメントの指定によって中継車両が絞り込まれるため，冗長度の増加は小さい．一方，CB-Flooding では隣接車両数が増加するとパケットが広範囲に拡散されやすくなり，冗長度が増大したと考えられる．図 10 とあわせて，冗長度の増加に伴い到達率が向上していることがわかる．

4.5　基地局配置に対する特性評価

図 4(a) において，基地局の配置パターンが与える影響を評価する．図 12 に示す道路モデル 1 の基地局配置パターンにおいて，各プロトコルのパケット到達率を評価した．

図 13 に道路モデル 1 における基地局配置パターンとパケット到達率の関係を示す．車両流入量は 200 veh/min で固定した．図 13 より，各プロトコルともに基地局位置によってパケット到達率に差が生じており，プロトコルによる傾向の違いは小さい．提案手法も基地局配置によって到達率の差が大きく，パターン 2 では 62%，パターン 5 では 37%の到達率を示した．パターン 5 のようにシミュレーションエリアの中心から遠い位置に基地局を配置した場合，他のパターンに比べて必要な平均の配信距離が長くなるため，平均の到達率が低下したとみられる．道路トポロジを考慮した提案手法であっても，配信距離や車両分布などの要素に対しては対処できていない．CB-Flooding は他のプロトコルと比べてパターン間の到達率の差が小さいが，CB-Flooding では中継方向が制限されずに複数の経路からパケットが伝搬するため，冗長度を犠牲にして基地局までパケットが到達する機会が増加したと考えられる．

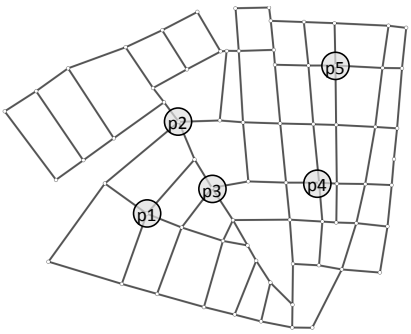


図 12　道路モデル 1 における基地局配置パターン

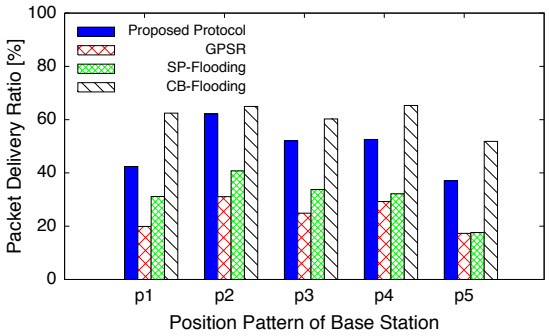


図 13　基地局配置パターンとパケット到達率
（車両流入量 200 veh/min）

5. おわりに

本稿では，実道路環境に適用可能なルーティングプロトコルの実現を目的として，道路トポロジ情報を利用したジオルーティング手法を提案した．道路主体の中継アプローチとして Road-Centric アプローチを利用し，ロバスト性と効率性をもつ道路適応型のルーティングを実現する．Road-Centric の観点から，送信車両による中継道路セグメント選択と，受信車両における CBF を用いた自律的な中継判断を統合することで，パケット到達性を改善しつつオーバーヘッドの増加を抑制する．道路地図を用いたシミュレーション評価では，提案手法は送信車両ベース手法の GPSR と比較して到達性を改善したが，受信車両ベースの CB-Flooding よりも低い到達性を示した．一方，提案手法は到達性に対する冗長度が小さく，効率的にパケットを配送可能であることを確認した．

今後は，パケット到達性の改善を課題として，提案手法を拡張する予定である．特に本稿の提案手法では，送信車両に隣接する道路セグメントの 1 つを中継道路セグメントとして選択するため，1 ホップあたりの配送距離が小さくなる．道路セグメントの選択候補を拡張することで，車両コネクティビティの活用とホップ数の抑制によるパケット到達性の改善が見込まれる．

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頂きました．

参考文献

[1] Li, F. and Wang, Y.: Routing in vehicular ad hoc networks: A survey, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 2, No. 2, pp. 12–22 (2007).
[2] 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).
[3] Karp, B. and Kung, H. T.: GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks, *Proc. ACM MobiCom '00*, pp. 243–254 (2000).
[4] 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).
[5] Naumov, V. and Gross, T. R.: Connectivity-Aware Routing (CAR) in Vehicular Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE INFOCOM 2007*, pp. 1919–1927 (2007).
[6] Williams, B. and Camp, T.: Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. ACM MobiHoc '02*, pp. 194–205 (2002).
[7] Bachir, A. and Benslimane, A.: A multicast protocol in ad hoc networks: inter-vehicle geocast, *Proc. IEEE VTC 2003-Spring*, pp. 2456–2460 (2003).
[8] Akamatsu, R., Suzuki, M., Okamoto, T., Hara, K. and Shigeno, H.: Adaptive Delay-based Geocast Protocol for Data Dissemination in Urban VANET, *Proc. The 7th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking* (*ICMU 2014*), pp. 141–146 (2014).
[9] 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).
[10] Frank, R., Giordano, E., Cataldi, P. and Gerla, M.: TrafRoute: A Different Approach to Routing in Vehicular Networks, *Proc. IEEE WiMob 2010*, pp. 521–528 (2010).
[11] Fogue, M., Garrido, P., Martinez, F. J., Cano, J.-C., Calafate, C. T. and Manzoni, P.: An Adaptive System Based on Roadmap Profiling to Enhance Warning Message Dissemination in VANETs, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 21, No. 3, pp. 883–895 (2013).
[12] 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 2014-10-20).
[13] 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).
[14] 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).
[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），入手先〈http://www.jari.or.jp/Portals/0/resource/pdf/H23_simyu/(Ver1.2) 20131010.pdf〉（参照 2014-10-20) (2013).

© 2014 Information Processing Society of Japan