

都市部のVANETにおける ビーコン制御を用いたルーティングプロトコル

佐々木 勇和^{1,a)} Wang-Chien Lee^{2,b)} 原 隆浩^{1,c)} 西尾 章治郎^{1,d)}

概要: 本稿では、車車間アドホックネットワーク (Vehicular Ad Hoc NETWORK: VANET) におけるビーコン制御を用いたルーティングプロトコル (Routing Protocol with Beacon Control: RPBC) を提案する。RPBC では、各端末がビーコン制御手法に基づいて、自律的にビーコンを送信するか決定する。パケットを送信する際は、道路に基づいて経路を決定し、ビーコンを送信した端末を宛先とする。道路に基づいた経路であるため、パケットは交差点を経由して目的地に送信される。ビーコン制御手法では、交差点上にいる端末が、まずビーコンを送信する。ビーコンを受信した端末は、自身がビーコンを送信するかどうかをビーコンの受信状況から決定する。端末が自身と同じ道路上にいる両方向の端末からビーコンを受信した場合、その端末はビーコンを送信しない。これにより、ネットワーク全体における、ビーコンの送信量を減少しつつ、交差点間の接続性を保証することが可能である。さらに、パケットに送信者の位置情報を添付することにより、パケットを受信した端末は送信者の位置を把握することができる。そのため、ビーコンを送信する直前にパケットを送信した端末は、ビーコンを送信しない。一方、パケットを受信した端末は、パケットをビーコンの代わりに利用する。これにより、ビーコンの送信量をさらに減らすことが可能となる。シミュレーション実験の結果より、RPBC は高到達率、低遅延、および低オーバーヘッドを達成していることを確認した。

1. はじめに

近年、安全および快適な道路交通のために、高度道路交通システム (Intelligent Transportation System: ITS) の研究開発が盛んに行われている。ITS において、車車間アドホックネットワーク (Vehicular Ad Hoc NETWORK: VANET) におけるルーティングプロトコルが注目されている。例えば、ITS のアプリケーションでは、都市部において、VANET を用いて渋滞や事故情報などのメッセージを特定の目的地 (病院、警察署、および Wifi スポット) に転送することが考えられる。この時、車両のみで構築する VANET と、固定端末と車両で構築する VANET が考えられる。固定端末を用いて VANET を構築する方が車両のみで構築する場合より通信は安定するが、固定端末を配置するためのコストがかかる。そのため、車両のみで構築する VANET におけるルーティングプロトコルは、重要な課題となっている。図 1 を用いて、都市部において交通事故が

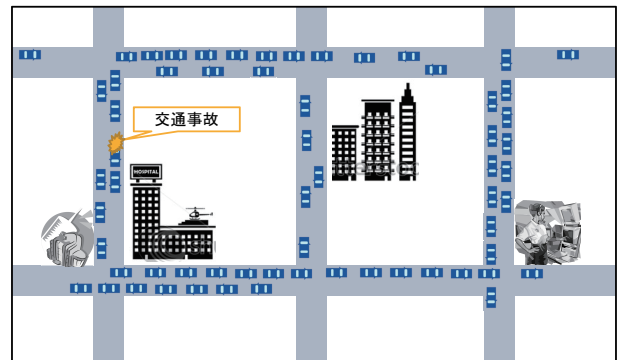


図 1 VANET の例

発生した場合の例を示す。事故が発生した場合、事故発生地点や事故車両の情報を警察署や病院へ間にある車両を経由して送信する。情報を警察署や病院に直ちに送信することにより、人命救助や事故対応を迅速に行うことができる。

VANET はモバイルアドホックネットワーク (Mobile Ad Hoc NETWORK: MANET) の一種であるため、動的なネットワークトポロジの変化や無線通信などの同じ特徴をもつ。しかし、VANET 特有の特徴も多い。例えば、端末の高速移動、端末の疎密の差、制限された移動モデル、十分な電源容量などがある。そのため、MANET のルーティングプロ

¹ 大阪大学情報科学研究科マルチメディア工学専攻

² Pennsylvania State University

a) sasaki.yuya@ist.osaka-u.ac.jp

b) wlee@cse.psu.edu

c) hara@ist.osaka-u.ac.jp

d) nishio@ist.osaka-u.ac.jp

トコルを直接 VANET に適応することは難しい。ルーティングプロトコルの代替案として、位置情報を用いたルーティングであるジオルーティング [1], [5], [6] がある。ジオルーティングでは、目的地に最も近い隣接端末にパケットを送信していき、目的地までパケットを届ける。この方法では、障害物などにより、自身より目的地に近い隣接端末が存在しない場合、パケットの破棄、もしくは迂回路を探す必要がある。そのため、建物が多い都市部においてはこの通信方法が適しているとはいえない。一方、道路には建物がないため、道路を考慮したルーティングプロトコル [8] が VANET に適している。道路を考慮したルーティングプロトコルでは、交差点を経由して、パケットを目的地に届けるため、交差点に最も近い端末にパケットを送信する。このとき、ビーコンを用いて隣接端末の位置情報を把握し、パケットの宛先を決定することが一般的である。ビーコンにより、事前に隣接端末の位置を把握できるため、遅延を小さくすることができる。しかし、都市部においては、端末数が多く、全ての端末がビーコンを送信すると、オーバーヘッドが非常に大きくなってしまう。また、既存研究では、隣接する交差点に最も近い端末にパケットを送信する。しかし、都市部においては、隣接していない交差点にも 1 ホップでパケットが到達する場合があるため、無駄に目的地までのホップ数が増加する可能性がある。

そこで、本稿では、VANET におけるビーコン制御を用いたルーティングプロトコル (RPBC: Routing Protocol with Beacon Control) を提案する。RPBC では、各端末がビーコン制御手法に基づいて、自律的にビーコンを送信するか決定する。パケットを送信する際は、道路に基づいて経路を決定し、ビーコンを送信した端末を宛先とする。道路に基づいた経路であるため、パケットは交差点を経由して目的地に送信される。ビーコン制御手法では、交差点上にいる端末が、まずビーコンを送信する。ビーコンを受信した端末は、自身がビーコンを送信するかどうかをビーコンの受信状況から決定する。端末が自身と同じ道路上にいる両方向の端末からビーコンを受信した場合、その端末はビーコンを送信しない。これにより、ネットワーク全体における、ビーコンの送信量を減少しつつ、交差点間の接続性を保証することが可能である。ここで、既存の道路を考慮したルーティングプロトコルでは、隣接する交差点を次のパケットの目的地として、宛先となる端末を決定していた。しかし、都市部では、交差点間の距離が通信範囲より小さい場合がある。そのため、RPBC では、パケットの送信方向が変わる交差点のみをパケットの目的地とすることにより、パケットが目的地に到達するまでのホップ数を減少させる。これにより、パケットの衝突の可能性が減り、到達率が向上し、遅延とオーバーヘッドを減少させることができる。さらに、パケットに送信者の位置情報を添付することにより、パケットを受信した端末は送信者の位置を把

握することができる。そのため、ビーコンを送信する直前にパケットを送信した端末は、ビーコンを送信しない。一方、パケットを受信した端末は、パケットをビーコンの代わりに利用する (この処理をクエリビーコンと呼ぶ)。これにより、ビーコンの送信量をさらに減らすことが可能となる。

以下では、2. で、関連研究について述べ、3. で想定環境について説明する。その後、4. で提案手法について説明し、5. でシミュレーション実験の結果を示す。最後に 6. で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

本章では、ジオルーティングと VANET における既存のルーティングプロトコルを紹介する。

2.1 ジョルーティング

GPSR [6], GFG [1] および GOAFR [5] は、代表的な位置情報を用いたルーティングプロトコル (ジオルーティング) である。これらのジオルーティングでは、各端末がビーコンを隣接端末と交換し、隣接端末の位置を把握する。パケットを送信する際は、目的地に最も近い隣接端末を宛先としてパケットを送信し、目的地までパケットを届ける (この処理はグリーディフォワードイングと呼ばれる)。自身より目的地に近い端末がない場合は、迂回路を探すことにより、パケットの到達率を向上する。各プロトコルにより、迂回路を探す方法、およびグリーディフォワードイングに戻る基準が異なる。パケットが目的地に到達するまで、同様の処理が繰り返される。

グリーディフォワードイングを用いるルーティングは、障害物が多い場合に頻りに迂回路探すことになり、遅延およびオーバーヘッドが増大してしまう。そのため、建物が多い都市部では、有効ではない。

2.2 VANET におけるルーティングプロトコル

車車間のみで通信する道路を考慮したルーティングプロトコルが盛んに研究されている。GSR [8] は、都市環境を想定し、地図情報を用いて、ダイクストラ法により目的地までの最短経路を求め、その最短経路に沿ってパケットを転送する。GPCR [7] は、ほぼ GSR と同様であるが、地図情報を用いず、ビーコンの受信状況から自身が交差点上にいるか判断し、パケットの送信方向を変更すべきかを決定する。GeoDTN+Nav [2] は、無線通信に加えて、キャリアアンドフォワードを用いることにより、通信可能な端末が存在しない場合に、パケットが破棄されるのを防ぐ。基本的に無線通信によってパケットを送信していき、通信可能な端末が存在しない場合、キャリアアンドフォワードに切り替える。VADD [10] は、交通量を統計情報から既知であると想定し、交通量を考慮してパケットの経路を決定する。

パケットが目的地に到達するまでの遅延の観点から、キャリアアンドフォワードより、無線通信の方が効率的であるため、交通量の多い道路をパケットの経路とする。GyTAR [4] は、隣接する道路の距離と現在の交通量から経路を決定する。車両が交差点に到達したときに、ビーコンの受信状況から交通量を推測し、その情報を自身が出発した交差点へ通知する。この方法では、統計情報を用いず、隣接する道路の現在の交通量を把握することができるが、追加のオーバーヘッドが発生する。CAR [9] では、ビーコンのメッセージ数を減らすため、隣接端末の数によってビーコンの送信頻度を決定する。また、パケットに送信端末の位置情報を添付することにより、端末はビーコンの送信量をさらに減らすことができる。この方法は、提案するルーティングプロトコルの処理と似ているが、提案プロトコルでは各端末が協調してビーコンを送信するかどうかを決定する。一方、CAR では、まず送信端末から目的端末（移動端末）までの経路を見つけ、その経路を継続的な通信が終了するまで維持することを想定しているが、本稿では継続的な通信は想定しない。また、信号や渋滞の影響により、経路の維持が困難であるため、CAR のプロトコルは都市部での通信に適していない。上記の既存のプロトコルでは、全ての端末がビーコンを送信するため、車両数が多い都市部では、ビーコン送信によるオーバーヘッドが非常に大きくなる。

3. 想定環境

本稿では、都市部におけるVANETを想定する。VANETは、 n 台の端末 $V = (V_1, \dots, V_n)$ で構築され、端末が目的地（固定端末）を指定してパケットを送信する。各車両には、カーナビゲーションシステムが搭載されており、デジタル地図、およびGPSにより自身の位置情報と目的地の位置情報を正確に取得することが可能である。デジタル地図は、交差点の位置と交差点間を結ぶ道路によって構成されている。簡単化のため、道路幅は常に同じとする。各車両は、デジタル地図を用いて、ダイクストラ法により、端末から目的地までの最短経路を算出することができる。各車両の時刻は同期されているものとする。各車両は、802.11などの通信機器を用いて、車両間でパケットの送受信が可能であり、その通信距離は R とする。交差点間の距離は、 R より長いとは限らず、パケットは隣接していない交差点まで届く場合がある。その例として、マンハッタンの地図を図2に示す。図において、水平な道路における交差点間の距離は約280[m]であり、垂直な道路における交差点間の距離は約80[m]である。そのため、通信距離が250[m]である場合、水平な道路では隣接する交差点に1ホップではパケットは到達しないが、垂直な道路では3つ先まで到達することが可能である。

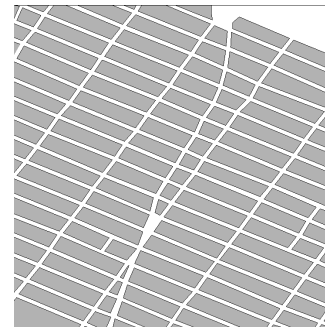


図2 マンハッタンの地図

4. 提案手法

本章では提案するルーティングプロトコルRPBCについて説明する。初めに、設計方針について述べる。その後、RPBCにおける、ビーコン制御手法、経路および宛先の決定手法、およびクエリビーコンについて説明する。

4.1 設計方針

ルーティングプロトコルは、パケットを高到達率、低遅延、かつ低オーバーヘッドで送信することが重要である。それぞれの端末がビーコンを用いて位置情報を交換することにより、事前に隣接端末の位置を把握できるため、低遅延を達成することができる。しかし、都市部では狭い地域に多くの端末がいるため、全ての端末がビーコンを送信すると、無駄なビーコンも多く、オーバーヘッドが大きくなる。少ない端末のみがビーコンを送信することで低オーバーヘッドを実現できるが、単純に間引くだけでは、到達率が低下する可能性がある。そのため、交差点間の接続性を保証しつつ、ビーコンの送信量を減らすことが重要となる。さらに、パケットに位置情報を含めば、ビーコンの代わりになるため、さらにオーバーヘッドを小さくすることができる。

また、パケットは少ないホップ数で目的地に到達することにより、オーバーヘッドおよびパケット衝突機会を減少させることができる。既存の道路を考慮したルーティングプロトコルでは、端末が隣接する交差点を目的地として、パケットを転送することが一般的であった。しかし、交差点間の距離が近い場合、隣接していない交差点がパケットの通信範囲内に入る可能性がある。そこで、各端末は送信方向が変わる交差点を目的地として、パケットを送信する。これにより、目的地までのホップ数を減少させることができる。

ここで、キャリアアンドフォワードを用いれば、オーバーヘッドを削減でき、パケットの到達率を向上させることができる。しかし、都市部においては信号の影響などによりキャリアアンドフォワードは遅延が非常に大きくなってしまふ。また、速度や移動方向などの情報をビーコンに含めなければならないため、ビーコンのメッセージサイズが大

きくなってしまふ．これらの理由により，提案プロトコルでは，キャリアアンドフォワードを利用しない．

4.2 ビーコン制御

既存研究では，全ての端末がビーコンを送信するため，ビーコン送信のためのオーバーヘッドが大きい．ビーコンは送信者の識別子と位置が含まれ，ビーコンを受信した端末は隣接端末の位置を把握できる．パケットを送信する際は，ビーコンを送信した端末の中から宛先が決定されるが，全ての端末がビーコンを送信すると，宛先を決定するのに不必要なビーコンも多い（例えば，端末がほぼ同じ位置にいる場合）．自身に近い端末がビーコンを送信した場合，ビーコンを送信しないとといった処理をすることにより，ビーコンの送信量を減少させることができるが，到達率が低下する可能性がある．そのため，経路構築に効果的な端末のみがビーコンを送信することが重要である．提案するビーコン制御手法では，それぞれの端末は自律的に自身がビーコンを送信すべきかどうかを決定し，ビーコンの送信にかかるオーバーヘッドをできる限り小さくしつつ，交差点間の接続性を維持する．

具体的には，まず交差点上にいる端末（交差点の中心から道路幅の半分以内にいる端末）が待ち時間 WT をビーコン間隔 p 毎に以下の式に従って設定する．

$$WT = Max_WT \cdot \left(\frac{r}{\alpha}\right). \quad (1)$$

Max_WT は待ち時間の最大値 ($0 < Max_WT < p$)， α は送信範囲 ($< R$)，および r は端末と交差点の中心間の距離を示す．ビーコンの送信者と自身との距離が送信範囲内の場合，その端末を隣接端末とする．送信範囲を設定する理由は，ビーコンは隣接端末の把握に用いられるが，距離が遠い端末との通信は端末の移動により，途切れやすく接続性を保証できないためである．この式より，交差点に近い端末ほど，小さい待ち時間が与えられる．最も小さい WT を設定した（最も交差点の中心に近い）端末が初めにビーコンを送信する．また，このとき，他の端末（交差点上にいない端末）は，待ち時間の設定をしない．これは，交差点上にいない端末がビーコンを送信しても，無駄になる可能性があるためである．具体的には，ビーコンを送信したにも関わらず，他の端末からビーコンを受信しない場合，パケットの送信時には送信する宛先がない，およびパケットを他の端末から受信することがないためである．ここで，目的地（固定端末）も，自身と端末との通信を保証するため，ビーコンを送信する．その際は， WT を 0 とする．

ビーコンを受信した端末は，送信端末との距離が α 以内の場合，送信者を自身の隣接端末として，識別子と位置を記録する．その後， WT を以下の式に従って設定する． WT を既に設定している端末は， WT を設定し直す．

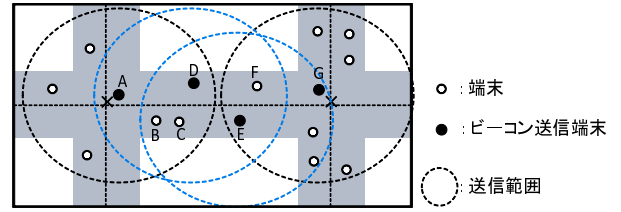


図 3 交差点間の距離が長い場合

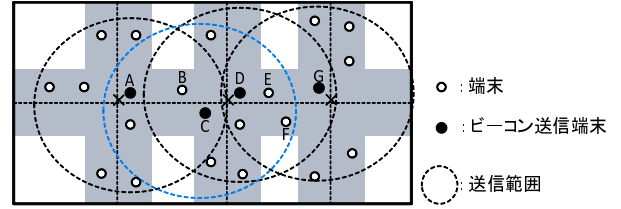


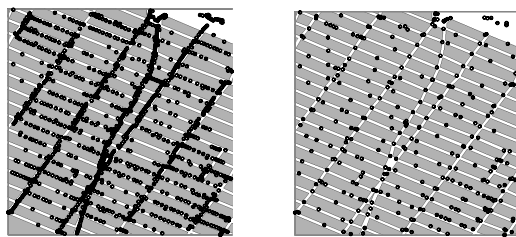
図 4 交差点間の距離が短い場合

$$WT = Max_WT \cdot \left(\frac{\alpha - d}{\alpha}\right). \quad (2)$$

d は，隣接する交差点の中心を結ぶ直線に送信端末と受信端末から下ろした垂線との交点の距離である．ビーコンを送信した端末から遠い端末ほど短い WT が設定されるため，送信範囲内の端末のうち最も遠い端末がビーコンを送信する．これにより，自身と近い端末がビーコンを送信する可能性が低くなる．以下の 2 つの場合において，待ち時間が経過しても，端末はビーコンを送信しない．まず，隣接する交差点上にいる端末が互いにビーコンを受信した場合，交差点間にいる端末はビーコンを送信しない．これは，交差点上，および交差点間にいる端末が隣接する交差点にパケットを送信することができるためである．次に，端末が同じ道路上の両方向（上下，もしくは左右）の端末からビーコンを受信し，かつ送信者間の距離が α 以内の場合，ビーコンを送信しない．これは，隣接端末が既にパケットを送信すべき方向からビーコンを受信しているためである．

これにより，各端末はパケットを送信すべき方向にいる隣接端末の位置を把握できるため，接続性を保証しつつ，ビーコンの送信量を減少させることができる．

図 3 および図 4 にビーコン制御の例を示す．図 3 は，交差点間の距離が送信範囲より長い場合，図 4 は，交差点間の距離が送信範囲より短い場合である．図における，白色のプロットは端末，黒色のプロットはビーコンを送信する端末，および点線の円は送信範囲を表す．それぞれの図において，水平の道路における制御のみを説明する．図 3 では， V_A および V_G がそれぞれの交差点に最も近い端末であるため，初めにビーコンを送信する． V_B ， V_C ，および V_D は， V_A からビーコンを受信し， V_E および V_F は V_G からビーコンを受信する．その後， V_D と V_E がそれぞれのビーコンの送信者（ V_A と V_G ）からの距離が遠いため，ビーコンを送信する． V_B と V_C は，同じ道路上の両方向の端末（ V_A と V_D ）からパケットを受信し， V_A と V_D 間の距離が



(a) 全て (b) ビーコン制御

図 5 ビーコン送信端末数

送信範囲内であるため、ビーコンを送信しない。 V_F も同様の理由によりビーコンを送信しない。図 4 では、 V_A 、 V_D 、 および V_G がそれぞれの交差点から最も近い端末であるため、初めにビーコンを送信する。 V_D と V_G が互いにビーコンを交換できているため、その交差点間にある端末、 V_E および V_F はビーコンを送信しない。一方、 V_A と V_D は互いに交換できていないため、 V_A から遠い端末である V_C がビーコンを送信する。

図 5 にビーコン制御の影響を示す。図内のプロットは、ビーコンを送信した端末の位置を表している。領域内には、1,500 台の端末が存在する。図 5(a) は、全ての端末がビーコンを送信している。つまり、ビーコンを送信している端末数は 1,500 台となる。一方、図 5(b) は、ビーコン制御手法に従って、ビーコンを送信している。交差点の端末がビーコンを送信し、交差点間の距離が長い場合に、道路上の端末がビーコンを送信しているのがわかる。ビーコンを送信している端末数は 349 台であり、大幅に削減できていることがわかる。

4.3 経路および宛先の決定

パケットは少ないホップ数で目的地に到達することが望ましい。RPBC では、経路をデジタル地図を用いてダイクストラ法により求められた最短経路とする。それぞれの端末はパケットをパケットの送信方が変わる交差点（一時的目的地と呼ぶ）へ向けて送信する。経路上で接続している道路がなす角が直線ではない場合、その道路間の交差点を一時的目的地とする。3つの交差点 (I_1 , I_2 , および I_3) が直線上にある場合、 I_1 と I_2 を結ぶ道路と I_2 と I_3 を結ぶ道路がなす角は 180 度となる。しかし、完璧に直線となる道路はほぼありえないため、本稿では 5 度のずれを許容することとする。この処理がパケットの送信方向が変わる交差点、もしくは目的地に到達するまで繰り返され、その交差点もしくは、目的地を一時的目的地とし、パケットは一時的目的地に向かって送信される。

パケットを送信する端末は、ビーコンを送信した端末のうち、最も一時的目的地に近い端末を宛先と決定する。パケットには、クエリの識別子、送信端末の識別子と位置、目的地の識別子と位置、および宛先の識別子が含まれる。

表 1 Parameters

Parameter	Meaning	Value
n	端末台数	500,1000, 1500 ,2000
QP	クエリ発行間隔 [sec]	60, 30 ,20,10,5
D	データサイズ [bytes]	32,128, 512 ,1024,2048

この処理を繰り返すことにより、目的地までパケットを転送する。

4.4 クエリビーコン

端末が通信範囲内にいる場合、自身が宛先でなくてもパケットを傍受することができる。パケットに送信者の位置情報が含まれている場合、受信端末は送信者の位置情報を把握することができる。そのため、パケットに位置情報を添付し、ビーコンの代わりに用いる。これをクエリビーコンと呼ぶ。

RPBC では、パケットをビーコンの送信間隔の予め決められた一定時間内に送信した場合、ビーコンを送信しない。ビーコンの送信間隔の直前にパケットを受信した場合、クエリビーコンを考慮して、ビーコン制御を行う。これにより、ビーコンの送信量をさらに減らすことができる。

クエリビーコンはパケットが頻繁に発生する環境で有効に働く。ネットワーク内のパケット数が多い場合、ビーコンの送信数が少なくなり、ネットワークの混雑を抑制することができる。

5. 評価

本章では、提案プロトコルの性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示す。本実験では、ネットワークシミュレータ Qualnet5.2 [11] を用いた。

5.1 シミュレーション環境

1,500 [m] × 1,500 [m] の 2 次元平面領域を TIGER/Line database of the US Census Bureau [12] から抽出した。本実験では、マンハッタンの一部を領域として用いた (図 2)。各端末の移動は、信号や速度制限が考慮されている VanetMobiSim [3] によって生成し、生成された移動ファイルを Qualnet 用の入力ファイルに変換して用いた。領域内に n 台の端末が存在する。各端末は IEEE 802.11b を使用し、伝送速度 11 [Mbps]、通信伝搬距離が平面領域で、300 [m] 程度となる送信電力でデータを送信する。実際には、建物の影響により、通信距離は 250 [m] 程度になることが多い。

領域の中心を中心点とする 1,000 [m] 四方の正方形内にいる端末が、 QP [sec] 毎に、データサイズ D [bytes] のパケットを送信する。目的地は領域内の 10 箇所とし、パケット毎にランダムに選ばれる。ビーコン間隔は、0.5 [sec] とし、各ビーコン間隔の 0.1 [sec] 前にパケットを送信した場

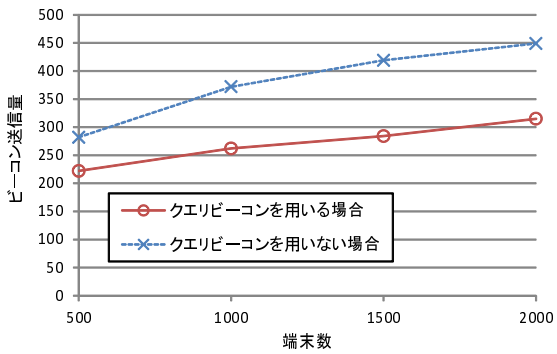


図 6 クエリビーコンの影響

合、ビーコンの送信をしない。ビーコン（およびクエリビーコン）を受信した端末は、送信者が 200[m] 以内にいる場合、そのビーコンの情報を記録する ($\alpha = 200[\text{m}]$)。一時的目的地に近い端末からビーコンを受信していない場合、それ以前のビーコン（1 秒前までのビーコン）の情報を用いてパケットを送信する。以前のビーコンにも、一時的目的地に近い端末がない場合、パケットを破棄する。表 1 に本実験で用いたパラメータを示す。各パラメータは基本的に太字のものを用いるが、そのパラメータの影響を調べる際には変化させた。

本実験では、RPBC を GSR と比較した。GSR では、経路をデジタル地図を用いてダイクストラ法により求められた最短経路とし、その経路上の交差点に向けてパケットを送信する。このプロトコルでは、全ての端末がビーコンを送信する。

以上のシミュレーション環境で、端末を 30 秒移動させ、その後 30 秒間、各端末が送信したパケットについて、以下の評価値を調べた。

- 到達率: パケットが目的地に到達する割合。
- 遅延: パケットを送信してから目的地に到達するまでの平均時間。

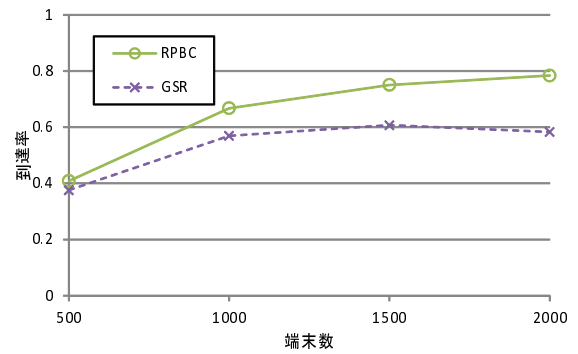
5.2 クエリビーコンの影響

まず、RPBC において、クエリビーコンを用いた場合と用いない場合のビーコン間隔毎のビーコンを送信した端末の平均台数を調べた。その結果を図 6 に示す。このグラフにおいて、横軸は端末数を表し、縦軸はビーコン送信量を表す。

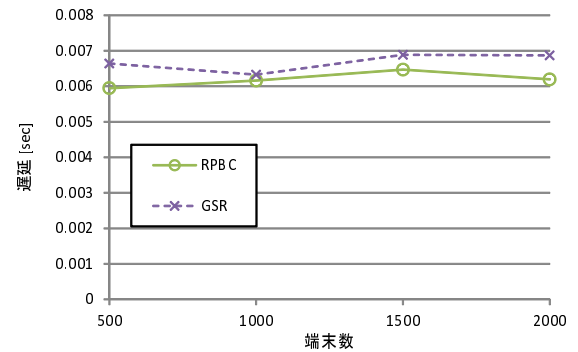
図 6 から、クエリビーコンを用いた方が、全ての端末数においてビーコン送信量が少ないのがわかる。これにより、クエリビーコンを用いることの有効性を確認できる。端末数が増えるにつれて、ネットワーク内のパケット数も増加するため、差が大きくなる。

5.3 端末数の影響

端末数 n を変化させたときの影響を調べた。その結果を



(a) 到達率



(b) 遅延

図 7 端末数の影響

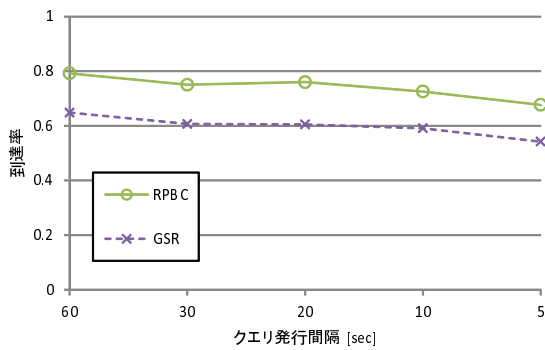
図 7 に示す。これらのグラフにおいて、横軸は端末数を表し、縦軸は図 7(a) では到達率、図 7(b) では遅延をそれぞれ表す。

図 7(a) から端末数が増加すると、到達率が高くなるのがわかる。これは、端末数が多くなることにより、交差点間の端末数が多くなり、パケットが送信される経路上で断続が発生しづらくなるためである。RPBC は GSR よりも高い到達率を示している。これは、ビーコンを制御することによって、ネットワークの混雑を防いでいること、および目的地までのホップ数が短いことが影響している。特に、端末数が 2,000 のときに、その差が顕著に表れている。GSR の到達率が若干低下しているのに対し、RPBC の到達率は増加している。これは、端末の増加に伴い、GSR ではビーコン数が多くなり、パケットが衝突しやすくなるが、RPBC ではビーコン制御によって、端末数が増加してもそれほどビーコン数が増加しないことが原因である。

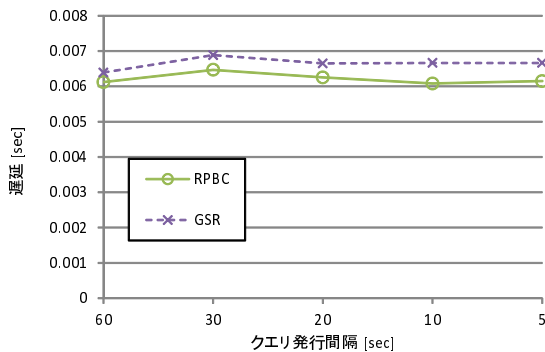
図 7(b) から、両プロトコルともに、端末数によらず遅延はほぼ一定であることがわかる。RPBC の遅延の方が若干小さい。これは、目的地までのホップ数が短いことが影響している。

5.4 クエリ発行間隔の影響

クエリ発行間隔 QP を変化させたときの影響を調べた。その結果を図 8 に示す。これらのグラフにおいて、横軸はクエリ発行間隔を表し、縦軸は図 8(a) では到達率、図 8(b) では遅延をそれぞれ表す。

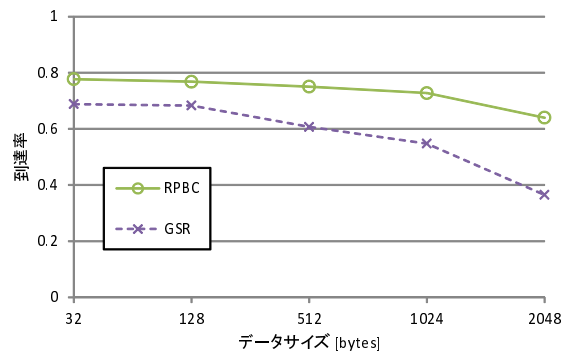


(a) 到達率

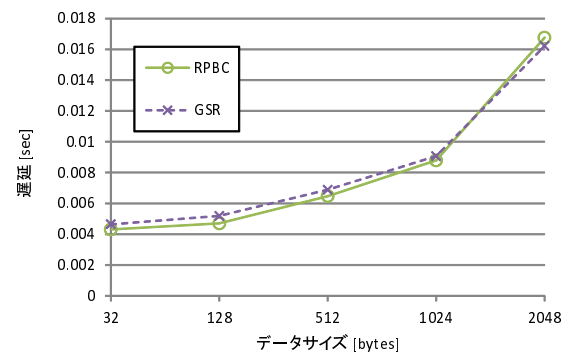


(b) 遅延

図 8 クエリ発行間隔の影響



(a) 到達率



(b) 遅延

図 9 データサイズの影響

図 8(a) から、クエリ発行間隔が短くなると、到達率が小さくなるのがわかる。これは、パケット発行間隔が短くなると、ネットワーク内のパケット数が増加し、パケットの衝突が発生しやすくなるからである。RPBC の方が到達率が高いのは、ビーコン制御によってネットワークの混雑を防げていること、および目的地までのホップ数が短いことが影響している。

図 8(b) から、クエリの発行間隔に関わらず、遅延はほぼ一定であることがわかる。RPBC の方が若干小さいのは、図 7(b) と同様の理由である。

5.5 データサイズの影響

データサイズ D を変化させたときの影響を調べた。その結果を図 9 に示す。これらのグラフにおいて、横軸はデータサイズを表し、縦軸は図 9(a) では到達率、図 9(b) では遅延をそれぞれ表す。

図 9(a) から、データサイズが大きくなると、到達率が低下しているのがわかる。これは、データサイズが大きくなることにより、パケットの衝突が発生しやすくなるからである。RPBC の到達率の方が高いのは、上述と同様の理由であるが、データサイズが 2048[bytes] のとき、GSR と RPBC の差が大きい。これは、データサイズが大きい場合は、特に、ホップ数が短いことが重要であることを表している。

図 9(b) から、データサイズが大きくなると、遅延が大

きくなっているのがわかる。これは、データサイズが大きくなると、データの送信に時間がかかるためである。RPBC と GSR はほぼ同じ遅延となっている。しかし、遅延はパケットが目的地に届いた場合の平均遅延となっており、GSR では目的地に近い場合のみ到達していることが多い。一方、RPBC では、目的地が遠い場合でも届いているため、実際の遅延は RPBC が若干短いことがわかる。

6. おわりに

本稿では、都市部の VANET におけるルーティングプロトコル RPBC(Routing Protocol with Beacon Control) を提案した。RPBC では、ビーコンを制御することにより、ビーコンの送信量を減らし、ネットワークの混雑を抑制する。さらに、目的地までのホップ数を短くすることにより、パケットの衝突の機会を減少できるため、到達率が向上し、遅延が減少する。また、パケットに位置情報を添付することにより、パケットをビーコンの代わりに用い、ビーコンの送信量をさらに減少させる。

シミュレーション実験では、現実的な環境を想定し、評価を行った。マンハッタンの地図情報を用いて、端末の移動を信号および速度制限を考慮して決定し、さらに、通信において建物の影響を考慮した。シミュレーション実験の結果から、RPBC は高到達率、低遅延、低オーバーヘッドを達成していることを確認した。

RPBC では、パケットの目的地に自身より近い隣接端

末がない場合、パケットを破棄する。そのため、ネットワーク内にいる端末数が少ない場合、到達率が低下した。キャリアアンドフォワードを用いたり、迂回路を探すことにより、到達率をさらに向上することができると考えられるが、遅延が大きくなってしまう。そこで、複数経路によって、パケットを目的地に送信することができれば、迂回路を探すことなく、パケットを目的地に到達させることが可能であると考えられる。今後は、複数経路によってパケットを目的地に到達させる方法を検討する予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省研究費補助金・基盤研究 S (21220002)、および基盤研究 B (24300037) の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] P. Bose, P. Morin, I. Stojmenovic, and J. Urrutia, "Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks," *ACM Wireless Network*, 7(6): pp. 609–616, 2001.
- [2] P.C. Cheng, K.C. Lee, M. Gerla and J. Härri, "GeoDTN+Nav: geographic DTN routing with navigator prediction urban vehicular environments," *MONET*, 15(1): 61–82, 2010.
- [3] J. Harri, M. Fiore, F. Filali, and C. Bonnet, "Vehicular mobility simulation with VanetMobiSim," *Simulation*, 87(4), pp.275–300, 2011.
- [4] M. Jerbi, S.M. Senouci, T. Rasheed and Y.G. Doudane, "Towards efficient geographic routing in urban vehicular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(9): pp. 5048–5059, 2009.
- [5] F. Kuhn, R. Wattenhofer, Y. Zhang, and A. Zollinger, "Geometric ad hoc routing: of theory and practice," in *Proc. 22nd Annual Symposium Principles Distributed Computing*, pp.63–72, 2003.
- [6] B. Karp and H.T. Kung, "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless network," in *Proc. Mobile Computing and Networking.*, pp. 243–254, 2000.
- [7] C. Lochert, M. Mauve, H. Füßler and H. Hartenstein, "Geographic routing in city scenarios," *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 9(1): pp. 69–72, 2005.
- [8] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, D. Herrmann, H. Füßler and M. Mauve, "A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments," in *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2003)*, pp.156–161, 2003.
- [9] V. Naumov and T.R. Gross, "Connectivity-aware routing (CAR) in vehicular ad hoc networks," in *Proc. Infocom 2007*, pp.1919–1927, 2007.
- [10] J. Zhao and G. Cao, "VADD: vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks," in *Proc. Infocom 2006*, pp.1–12, 2006.
- [11] Scalable Networks: makers of QualNet and EXata, the only multi-core enabled network simulation and emulation software.[Online].Available: <http://www.scalable-networks.com/>.
- [12] U.S.Census Bureau-TIGER/Line [Online]. Available: <http://www.census.gov/geo/www/tiger/>.