

路側機で補助された VANET における一方通行道路の利用 Utilizing One-way Roads in Static-node-assisted Vehicular Networks

荒木 大志† 吉廣 卓哉‡
Daichi Araki Takuya Yoshihiro

1. はじめに

車社会の発展に伴い、高度道路交通システム(ITS: Intelligent Transport Systems)と呼ばれる交通の効率化、安全化、快適化を目的とした様々なシステムやサービスが考案されている[1]。日本でこれらの一部は、DSRC(Dedicated Short Range Communication)[2]や VICS(Vehicle Information and Communication System)[3]といった路側に設置された狭域通信機器や光ビーコン、電波ビーコン等を用いた情報通信システムにより提供されることが多い。しかし、これらのシステムを用いて通信範囲を拡大し国内の道路全体をカバーするには膨大なコストがかかる。

低コストに通信範囲を拡大できる手法として、MANET (Mobile Ad hoc Network)の車々間通信への利用が考えられる。MANET とは移動可能なモバイル無線端末同士がその場で自律的にネットワークを構築し、複数の端末を経由して通信を行うネットワーク形態である。MANET では多くの場合、リンク状態型ルーティング方式や距離ベクトルルーティングが用いられ、MANET 特有の問題を解決する様々な工夫がなされている。しかし、これらのルーティング方式をそのまま車両に適用させると車両特有の高いモビリティのため、ネットワーク維持が困難であり不安定なネットワークとなる。

そこで近年、MANET を応用し車両同士がネットワークを構築しマルチホップ通信を行う VANET (Vehicular Ad hoc Network)[4]に関する研究が盛んに行われている。VANET では多くの場合にジオグラフィックルーティング方式が利用されている。これは、各車両が GPS 等から位置情報を取得し自身の通信範囲内に存在する車両の中から宛先に最も近い車両を選択しパケット送信を繰り返すことで、最終的にパケットを宛先に届けるルーティングである。しかし、車両の移動に伴ったリンク切断が頻発するので、ネットワークを確立するには一定以上の車両密度が必要となる。周辺にパケットを送信できる車両が存在しない場合でも、パケットが破棄されない Carry and Forward と呼ばれるルーティング手法がある。これは、車両がパケットを保持したまま移動し通信可能な車両と遭遇したときパケット送信を行う。しかし、この手法でも車両密度が低い場合にパケットを搭載している車両が他の車両にパケットを送信できない場合が存在するので、パケットを宛先まで転送するのは困難である。

阪口らは、前述の問題を解決するために道路交通網上の主たる交差点に有線ネットワークに接続されていない固定の無線基地局を設置し車両を伝送媒体として基地局間でパケットを交換するネットワーク形態とそのネットワーク上で動作する距離ベクトルルーティング手法を提案した[5]。このネットワークにおいて、パケットは車両によって複数の基地局を中継して宛先に配送される。各基地局は道路ご

との交通量を考慮し、交通量の多い道路を優先的に選択することで基地局間での効率的なパケット配送を実現した。しかし、阪口らの手法では、各基地局は車両を用いて他の基地局と往路と復路それぞれ異なった情報のやり取りをすることでその基地局間の道路を経路として選択できる仕組みとなっているため、車両の流れが片方しかない一方通行道路を経路として選択できない問題が存在する。これによりパケットの伝送遅延が大きくなる場合がある。

そこで本研究では、阪口らの手法を拡張し一方通行道路を経路として選択可能とすることで、パケット配送において従来の手法よりも低遅延な経路を選択できるルーティング手法を提案する。

本論文は以下のように構成される。第 2 章では関連研究について述べる。第 3 章では阪口らの手法を説明した上で提案手法について述べる。第 4 章では提案手法の評価を行う。

2. 関連研究

VANET におけるジオグラフィックルーティングの代表的な手法の 1 つに GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)[6]がある。これは、自身の通信範囲内に存在するノードの中から宛先ノードに最も近いノードを Greedy に選択して自身より近いノードがなければ迂回する経路を選択する手法である。しかし、GPSR をはじめとするジオグラフィックルーティング方式では、車両の移動に伴ったリンク切断が頻発するので、通信を確立するには一定以上の車両密度が必要となる。

VADD (Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks)[7]は、Carry and Forward 方式を用いた VANET のルーティング手法の一つで、車両はあらかじめ各道路を走行する車両の密度や速度、交通量に関して統計的な情報を取得できる前提として、最短経路を選択するのではなく交通量が多く伝送遅延が最小になる経路を推定しパケットの転送を行う。しかし、VADD においても車両密度が低い場合には、パケットを搭載している車両が、他の車両にパケットを送信できない場合があるので、宛先までパケットを転送するのは困難である。

SADV (Static-Node-Assisted Adaptive Data Dissemination in Vehicular Networks)[8]は、交差点に設置した、パケットを送受信できる無線基地局を用いる。無線基地局は、リアルタイムで隣接する無線基地局間の遅延時間を測定し、それが最小となる経路を選択する。無線基地局が、車両から受け取ったパケットを一時的に保持することで車両密度に関係なく最適な経路を選択できる。しかし SADV では、交通量に応じてパケットの複製や経路の選択をしないので、パケットの高い到達率を保証することは難しい。このように、VANET におけるルーティングプロトコルは多く提案されているが、道路交通網上で車両を用いた通信を実現するためには、車両の粗密に影響を受けない高信頼なルーティングプロトコルの存在が望ましい。

† 和歌山大学, Wakayama University

‡ 和歌山大学, Wakayama University

3. 道路交通網上における高信頼な距離ベクトルルーティング

本章では阪口らの手法とその問題点をそれぞれ示す。

3.1 前提条件

本研究において前提とする道路交通網は一般道路であり、主な交差点に無線基地局(以下ノード)が設置される。車両がノードに到達した際には、車両とノードは互いに通信を行うことができる。本研究で使用する無線通信方式は特に限定しないが、例えば Wi-Fi のように通信範囲が数十～数百メートル程度の方式を想定する。車両は GPS 等の位置情報測位機器を搭載しているものとする。また車両と車両、車両とノードは、最低でも数 kBytes の通信が可能なものとする。本研究において、あるノードからみて車両が他のノードを通らずに直接到達できるノードを隣接ノードと定義する。図 1 に想定する道路交通網とノード配置の一例を示す。図 1 では、N6 に対して N2, N5, N7, N10 が隣接ノードとなる。また、あるノード S からあるノード D に到達するまでに車両が遭遇するノードの数をホップ数として定義する。図 1 では、N1 から N4 までは 3 ホップとなる。また、あるノード S からあるノード D に到達するまでに必要な車両の台数をキャリアという単位で定義する。図 1 では、例えば N1 から N16 まで到達可能なら、N1 から N16 までは 2 キャリアとなる。

3.2 概要

阪口らの手法は、距離ベクトル型ルーティングアルゴリズムに基づいて設計されている。まず、各ノードから車両 1 台 (1 キャリア) で高確率に到達できるノードを発見する。1 キャリアの経路情報をノード同士が車両を介して交換し合うことで、自身から車両複数台で到達可能な宛先ノードとそのノードに到達するためにパケットを中継する 1 キャリアノード、そして距離(キャリア数)を把握する。各ノードは、距離が最小となる経路を選択することで最適な経路を選択することができる。これらを実現するために本研究では以下のメッセージを用いる。

- 1) Hello メッセージ
- 2) Statistic メッセージ
- 3) 1-Carry メッセージ
- 4) Multi-Carry メッセージ

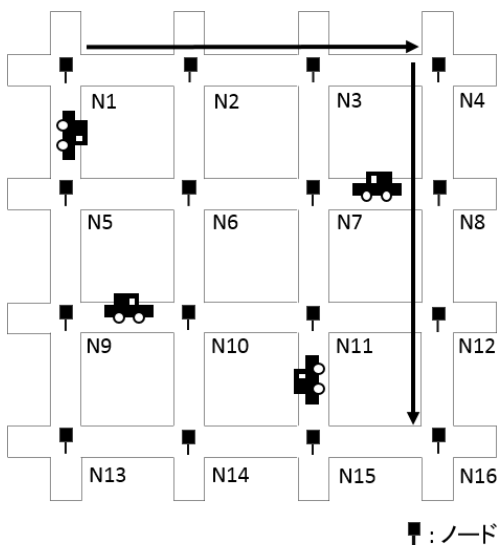


図 1: 想定する道路交通網とノード配置の一例

1) Hello メッセージは、2 ホップ前、1 ホップ前に通過したノードの組に対して、自身に到達した車両数を集計するためのメッセージである。2) Statistic メッセージは、各ノードが Hello メッセージで把握した到達車両数を隣接ノードに広告するためのメッセージである。Statistic メッセージを受信したノードは、ある車両が隣接ノード n_1 を通過して自身に通過した後、隣接ノード n_2 に向かう確率を計算することができる。3) 1-Carry メッセージは、Statistic メッセージで把握した車両の到達確率を他のノードに広告する。1-Carry メッセージを受け取った各ノードは、複数ホップ離れたノードに到達できる確率を計算し、車両一台で高確率で到達可能なノードを 1 キャリアノードとして把握する。4) Multi-Carry メッセージは、1-Carry メッセージで把握した 1 キャリアノードを他のノードに広告する。これにより各ノードは、車両複数台で到達可能なノードを把握することができる。

あるノードから宛先までのパケット配送は以下のように行う。パケットがあるノードで発生したとき、ノードは自身の経路表からパケットの宛先に対応する中継ノードを検索する。車両が自身に到達したとき、車両が通過してきた 1 ホップ前ノードを、Hello メッセージが持つ 1 ホップ前ノードのアドレスより判断し中継ノードまで高確率で移動する車両にパケットを送信する。このとき中継ノードまでの到達確率から一定以上の到達確率を確保するために、パケットの複製を行い送信する。パケットを受け取った中継ノードは、宛先までの新たな中継ノードを検索し、前述のように複製したパケットをそのノードに向かう車両に送信する。これを繰り返すことで、複数のノードと車両を用いたマルチホップ通信を実現する。

3.3 車両ノード間のメッセージ処理

制御メッセージを 1 つの制御メッセージセットにまとめて送信することで、送受信時のオーバーヘッドを最小に抑えることができる。

車両がノードに到達したとき、まず車両からノードに対して制御メッセージセットを送信する。これに対して、ノードは同様の制御メッセージセットを車両に送信する。制御メッセージセットは Hello メッセージ、Statistic メッセージ、1-Carry メッセージ、Multi-Carry メッセージの各メッセージを含む。ノードと車両の間で、2 つの Hello メッセージ、1 つの Statistic メッセージ、 $N_{encount}$ 個の 1-Carry メッセージ、 $N_{encount} \times MC_{send}$ 個の Multi-Carry メッセージが送信される。ここで、 $N_{encount}$ は車両がこれまで遭遇したノードの個数、 MC_{send} はノードが車両に送信する Multi-Carry メッセージの個数である。1-Carry メッセージはノードに遭遇するたびに 1 つ、Multi-Carry メッセージはノードに遭遇するたびに MC_{send} 個、ノードから車両に、車両からノードに渡されることになる。 $N_{encount}$ と MC_{send} は事前に定数として設定されることにより、1-Carry メッセージ及び Multi-Carry メッセージの車両への最大積載量を制限することが可能で、帯域の圧迫を防ぐことができる。これによりメッセージセットのデータ量を数 kBytes 程度に制限することができる。ノードから車両に送信するメッセージが、これらの値以上になる場合、ノードはランダムにメッセージを削除することによりメッセージサイズを保つ。

3.4 高確率で到達可能な 1 キャリアノードの把握

1 キャリアノードの把握には、Hello メッセージ、Statistic メッセージ、1-Carry メッセージの 3 つを用いる。それぞれのメッセージ処理を後述する。

●Hello メッセージ処理

Hello メッセージは、車両と遭遇したノードによって生成される。このメッセージには、生成したノードのアドレスが保持される。Hello メッセージは車両によって 2 ホップ離れたノードまで運ばれる。これにより、各ノードは自身から 2 ホップ離れたノードの存在を把握することができる。

車両はノードに到達したとき搭載している全ての Hello メッセージを送信し、逆にノードは自身が生成した Hello メッセージを車両に送信する。Hello メッセージは、ノードに生成されてから他ノードに 2 回到達したとき削除される。

車両は通常、1 ホップ前と 2 ホップ前のノードで生成された Hello メッセージをノードに送信する。つまり、これらの Hello メッセージを受け取ったノードは、車両がそのノードに到達する 2 ホップ前までの経路と車両数を集計し、その値を Hello カウントテーブルで保持する。

Hello メッセージにより Hello カウントテーブルが生成される様子を図 2 を用いて説明する。ここで、 N_1 、 N_2 、 N_3 と通過する車両の流れがあるとすると、このとき車両には、 N_1 、 N_2 で発行された Hello メッセージが搭載されている。 N_3 の Hello カウントテーブルでは、2 ホップ前ノードアドレス N_1 、1 ホップ前ノードアドレス N_2 、そして自身 N_3 の組に対して、過去 t_1 時間にそれらを通り過ぎてこのノードに到達した車の台数(通過車両数) $c(N_1, N_2, N_3)$ を保持する。Hello カウントテーブルは、後述する Statistic メッセージによって、交差点上の車の移動パターンを把握するために使われる。

●Statistic メッセージ処理

Statistic メッセージは、ある方向から車両がノードに到達したとき、その車両が次にどのくらいの確率で 1 ホップ先ノードに到達するかを把握するために用いられる。

Statistic メッセージは、そのメッセージを生成したノードの Hello カウントテーブルがもつ全ての情報を含む。車両がノードに到達したとき、車両は搭載している Statistic メッセージをノードに送信し、逆にノードは自身が持つ Hello カウントテーブルの情報を Statistic メッセージとして車両に送信する。この処理により各ノードは、全隣接ノードの Hello カウントテーブルを集約できる。各ノードは、集約した隣接ノードの Hello カウントテーブルから、1 ホップ前ノードから自身を通過し 1 ホップ先ノードへ到達する車両の確率を計算し、Statistic テーブルでその確率を保持する。Statistic メッセージにより、Statistic テーブルが生成される様子を図 2 を用いて説明する。車両が N_1 から N_2 へ到達したとする。このとき N_2 は、車両から N_1 が生成した Statistic メッセージを受信することで N_3 から来て自身 N_2 を通過し N_1 に到達した車両数 $c(N_3, N_2, N_1)$ を知ることができる。同様に N_4 、 N_5 から Statistic メッセージを受信することで、 N_2 は、 N_3 を通過し自身に到達した車両がそれぞれ N_1 、 N_4 、 N_5 に到達した車両数を知ることができる。つまり、 N_3 から来て N_1 に到達した車両の台数 $c(N_3, N_2, N_1)$ を N_3 から来た車両の合計台数 $c(N_3, N_2, N_1) + c(N_3, N_2, N_4) + c(N_3, N_2, N_5)$ で割ることで、 N_3 から来た車両が次に N_1 に到達する確率 $p(N_3, N_2, N_1)$ を計算できる。 N_2 は、この処理を全ての 1 ホップ前ノードと 1 ホップ先ノードの組に対して行い計算した確率を Statistic テーブルで保持する。

●1-Carry メッセージ処理

1-Carry メッセージは、各ノードが自身から 1 キャリーの距離にあるノードへのホップ数と到達確率を把握するために用いられる。1-Carry メッセージには、Statistic メッセー

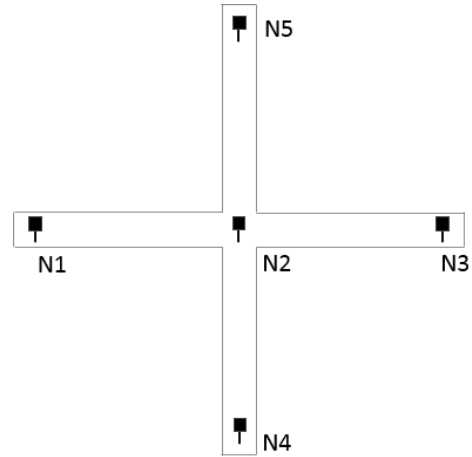


図 2: 道路交通網とノード配置の一例(1)

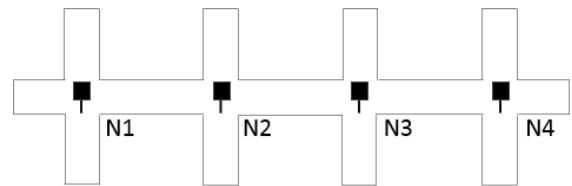


図 3: 道路交通網とノード配置の一例(2)

ジから得られた、車両が進んできた道路を逆向きに進むときの確率が格納されている。1-Carry メッセージを受け取ったノードは、自身から車両が通過してきた各ノードに対する到達確率を計算することができる。

1-Carry メッセージの動作を図 3 を用いて説明する。車両が N_1 を通過して N_2 に到達したとする。 N_2 は Statistic テーブルから、車両が N_1 、 N_2 を通ったときに、最も到達確率が高い 1 ホップ先ノード N_3 、つまり $p(N_1, N_2, N_3)$ を検索し、その逆向きの到達確率、 $p(N_3, N_2, N_1)$ を 1-Carry メッセージとして車両に送信する。この車両が N_3 に到達すると、 N_3 は車両から $p(N_3, N_2, N_1)$ を受信する。 N_3 は $p(N_4, N_3, N_2)$ を知っているので、これから N_4 から来た車両が N_1 に到達する確率 $p(N_4, N_3, N_1) = p(N_4, N_3, N_2) \times p(N_3, N_2, N_1)$ を計算でき、同様に全ての 1 キャリーノードに対する到達確率の積として計算できる。各ノードはこれらの 1 キャリーノードに対する到達確率を 1-Carry テーブルに格納する。なお、この確率がしきい値 CP_{min} より低い値の場合には、高確率でパケットの転送が見込めないので 1-Carry テーブルにエントリを追加せず、 CP_{min} より高い値であるならば、1-Carry テーブルに登録または到達確率を更新する。1-Carry テーブルでは、各 1 キャリーノードまでのホップ数、到達確率、1 ホップ先ノードを保持する。

3.5 複数キャリーノードの把握

●Multi-Carry メッセージ処理

Multi-Carry メッセージは、複数の車両によって到達できる宛先への経路を広告するために用いる。このメッセージには、各ノードが持つ到達可能な宛先とその宛先に到達するための中継ノードと宛先までのキャリー数を含む経路情報を距離ベクトルルーティング手法を用いて他ノードに広告する。Multi-Carry メッセージを受信したノードは、経路情報に含まれる中継ノードにパケットを転送することで、宛先までパケットを到達させることができる。

Multi-Carry メッセージにより、経路表が構築される様子を図 4 を用いて説明する。ノード N_1 が生成した Multi-Carry メッセージが N_2 に届き、宛先 N_d に対して N_1 から距離が

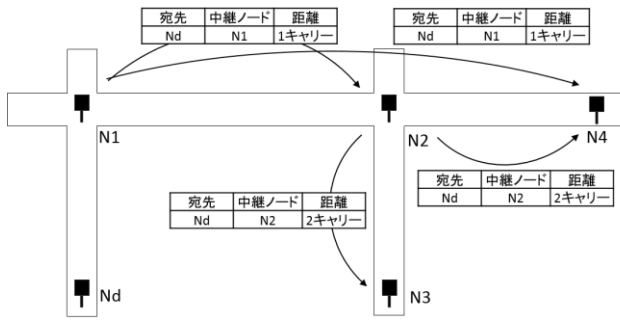


図 4: 道路交通網とノード配置の一例(3)

1 キャリアであると記載されているとする。N2 は距離を 1 キャリア増加させ宛先 Nd に対して N1 を中継すれば 2 キャリアで到達可能であると把握する。N2 はこの経路情報の中継ノードを自身に置き換えた Multi-Carry メッセージを広告する。このメッセージを N3 が受信した場合、宛先 Nd に対して N2 を中継すれば 3 キャリアで到達可能であると把握する。ここで N4 は N1 まで 1 キャリアで到達可能であると把握しているとする。N4 は N1 から受信した Multi-Carry メッセージから宛先 Nd までの最短経路 (2 キャリア) を把握しているので、N2 から Multi-Carry メッセージを受信してもこれを無視する。このようにして各ノードは、複数離れたノードとそれまでの最短な経路を保持する。

3.6 パケット配送

阪口らの手法では、全てのパケットはノード間で車両を伝送媒体として送信される。車両でパケットが発生した際に、車両が最初に遭遇したノードにパケットを渡すことでこれを実現することができる。

ノードは、隣接するノードの中から、Hello メッセージを受信できるノードの数だけ送信キューを持つ。これは 1 キャリア距離にある中継ノードに対して最も到達率の高い 1 ホップ前ノードを通過してきた車両を用いてパケットを配送するためであり、1 ホップ前ノードごとに送信キューを持たすことで処理を効率化する。

あるノードでパケットが発生したとする。このとき、ノードはパケットの宛先を自身の持つ経路表の宛先から検索し、一致したエントリの中継ノードをパケットの中継点アドレスフィールドに、ホップ数を TTL フィールドに書き込む。さらに、ノードが持つ Statistic テーブルと 1-Carry テーブルから、中継ノードまでの到達確率が高い 1 ホップ前ノードを決定し、対応する送信キューにエンキューする。

パケットを搭載した車両がノードに到達したとき、車両は自身の持つ全てのパケットの TTL を 1 だけ減らし、到達したノードが中継ノードまたは宛先ノードであるパケットを全てノードに送信する。到達したノードが中継ノードでも宛先ノードでもなく、TTL が 0 となった場合、パケットが正しく配送されなかったことを示すため、パケットは破棄される。ノードはパケットを受信すると自身が宛先ノードであるパケットを受信成功とし、自身が中継ノードであれば、前述の動作と同様に中継ノード、TTL を決定し対応する送信キューにエンキューする。さらに、車両の持つ Hello メッセージから 1 ホップ前ノードを特定し、対応するキューにパケットがあれば車両が保持できるだけのパケットを車両に送信する。このとき、冗長なパケット配送を防ぐために車両は複製した同一のパケットを配送しないものとする。また、車両が中継ノードに到達するか否かは確率的なものであるため、中継ノードまでの到達確率から、

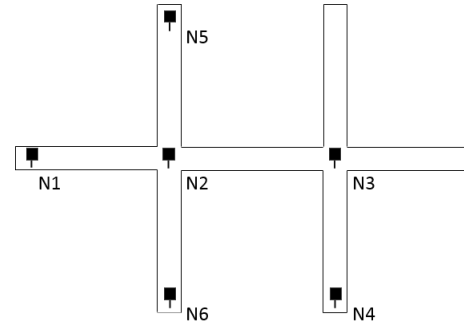


図 5: 道路交通網とノード配置の一例(4)

表 1: N₂ がもつ各種情報

経路表		
宛先ノード	中継ノード	キャリア数
N1	N1	1
N3	N3	1
N4	N3	2
...

1-Carry テーブル			
宛先	1ホップ先	到達確率	ホップ数
N1	N1	90%	1
N3	N3	90%	1
N5	N5	90%	1
N6	N6	90%	1
...

Statistic テーブル		
1ホップ先	1ホップ前	到達確率
N1	N3	90%
N5	N3	5%
N6	N3	5%
...

一定以上の到達確率が確保できるようにパケットを複製し送信する。これらの動作により、発生したパケットを宛先に配送することができる。N₂ から N₄ へパケットを配送する様子を図 5 の例を用いて説明する。表 1 に N₂ が持つ情報を示す。N₄ 宛へのパケットをもつ N₂ は、自身の経路表から、パケットの中継点ノードが N₃ であることがわかる。さらに Statistic テーブルと 1-Carry テーブルから N₃ に向かう確率が高い 1 ホップ前ノードが N₁ であることがわかる。これによりパケットを N₁ 用のキューにエンキューする。いま、ある時刻において車両が N₁ を通過して N₂ に到達したとする。このとき、Hello メッセージから、1 ホップ前ノードが N₁ であることがわかり、N₁ 用のキューからその車両が保持できるだけのパケットを車両に送信する。パケットが車両を通じて N₃ に送信されたとき、N₃ は自身が中継ノードであるため、次の中継ノードを決定し、そのノードに向かう確率が一番高い 1 ホップ前ノード用のキューにエンキューする。これらの動作を繰り返すことにより宛先ノードまでパケットを送信することができる。

3.7 既存手法の問題点

本研究では、一方通行開始ノードと一方通行終了ノードは互いに隣接ノードの関係で、一方通行終了ノードは一方通行開始ノードへの経路を把握できる前提であるとする。

阪口らの手法には、各ノードが一方通行道路を経路として選択できない問題がある。この問題は、一方通行開始ノードが一方通行終了ノードから Statistic メッセージを受信できないことで起こる。これにより、一方通行開始ノードは、隣接ノードである一方通行終了ノードへの到達確率を計算することができないので、パケット配送において迂回した経路を選択する。この結果、パケットの伝送遅延が大きくなる場合がある。この問題を図 6 の例を用いて説明する。N₃ を始点、N₂ を終点とした一方通行道路がある。この場合 N₂ は、Hello メッセージ処理により 2 ホップ前ノード N₄、1 ホップ前ノード N₃、自身 N₂ の組にして、これらを通じた車の台数 $c(N_4, N_3, N_2)$ を Hello カウントテーブルで保持する。しかし N₃ は、N₂ から $c(N_4, N_3, N_2)$ の情報を搭

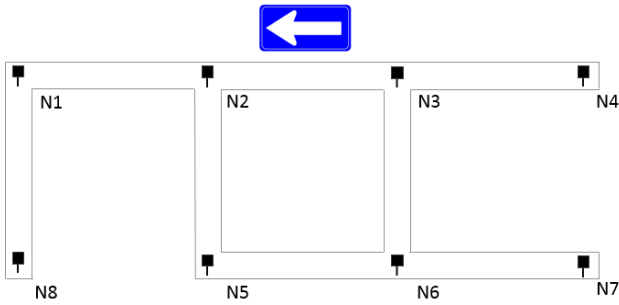


図 6：一方通行道路を含む道路交通網とノード配置の一例

載している **Statistic** メッセージを受信できないので N_4 から来た車両が次に N_2 に到達する確率 $p(N_4, N_3, N_2)$ を計算することができない。これにより N_3 から N_2 へのパケットの配送は N_6, N_5 を順に通過する迂回した経路となる。本論文では、一方通行開始ノードが一方通行終了ノードのもつ **Hello** カウントテーブルの情報を把握し一方通行終了ノードへの経路の計算することで、この問題を防ぐ方法を提案する。

4. 固定基地局を用いた高信頼な距離ベクトルルーティングの一方通行道路への対応

4.1 提案手法の概要

本研究では、阪口らの手法を拡張し一方通行開始ノードが、一方通行道路を経路として選択する手法を提案する。前述の既存手法の問題点を解決するために以下の手順で処理を行う。

- ① 一方通行開始ノードの特定：
一方通行終了ノードが、隣接するノードの中から全ての一方通行開始ノードの特定を行う。
- ② 一方通行終了ノードのメッセージ生成と送信：
一方通行終了ノードが、特定した一方通行開始ノード宛に自身の **Hello** カウントテーブルの情報を搭載したメッセージを生成し、そのメッセージを送信する。
- ③ 一方通行終了ノードへの経路計算：
一方通行開始ノードが、一方通行終了ノードから受信したメッセージから 3.4 節の動作処理により一方通行終了ノードへの経路を計算する。

これらの動作により、一方通行開始ノードは、一方通行終了ノードへのパケット転送において一方通行道路を経路として選択できる。詳細は①を 4.2 節、②を 4.3 節、③を 4.4 節で説明する。

4.2 一方通行開始ノードの特定

各ノードは、隣接するノードの中から全ての一方通行開始ノードの特定を行う。一方通行開始ノードは、以下の二つの条件両方を満たすノードである。

- 1) **Hello** カウントテーブルの 1 ホップ前に含まれているノード。
- 2) **Statistic** テーブルの 1 ホップ先に含まれていないノード。

この理由を以下に記述する。ある一方通行終点ノード n_0 は、隣接する一方通行開始ノード n_1 から **Hello** メッセージを受信可能なので、自身の **Hello** カウントテーブルに 1 ホップ前が n_1 のエントリが追加される。 n_0 は、 n_1 が生成する **Statistic** メッセージを受信しても自身の **Statistic** テーブルに 1 ホップ前が n_1 のエントリは追加されない。これは n_1 が、

表 2: N_2 がもつ各種情報

Helloカウントテーブル			Statisticテーブル		
2ホップ前	1ホップ前	車両台数	1ホップ前	1ホップ先	到達確率
N_8	N_1	30	N_1	N_5	100%
N_4	N_3	50	N_3	N_5	20%
N_6	N_3	20	N_3	N_1	80%
N_6	N_5	10	N_5	N_1	100%

表 3: N_3 がもつ Hello カウントテーブル

Helloカウントテーブル		
2ホップ前	1ホップ前	車両台数
N_5	N_6	30
N_7	N_6	20

n_0 から **Hello** メッセージを受信できないことに起因する。以上により一方通行開始ノードは、一方通行終了ノードの **Hello** カウントテーブルの 1 ホップ前に含まれるが、**Statistic** テーブルの 1 ホップ先に含まれない。

各ノードが、隣接するノードの中から一方通行開始ノードを特定する動作を図 6、表 2、表 3 を用いて説明する。 N_2 は、 N_3 または N_5 を通過した車両から **Hello** メッセージを受けると表 2 の **Hello** カウントテーブルをもつ。 N_3 は、 N_2 から **Hello** メッセージを受信できないので、自身がもつ **Hello** カウントテーブルは、 N_2 の情報を含まない表 3 の様になる。このため N_2 は、 N_3 から **Statistic** メッセージを受信しても自身から N_3 への到達確率を計算できないので、**Statistic** テーブルに 1 ホップ先ノードアドレスが N_3 のエントリは追加されない。このとき N_2 は、表 2 の **Statistic** テーブルをもつ。これらにより N_2 は、自身が持つ **Hello** カウントテーブルの 1 ホップ前ノード集合から **Statistic** テーブルの 1 ホップ先ノード集合に含まれていない N_3 を一方通行開始ノードと特定する。

4.3 一方通行終了ノードのメッセージ生成と送信

一方通行終了ノードは、隣接する全ての一方通行開始ノードを自身がもつ経路表の宛先から検索し、一致するエントリが存在すれば各一方通行開始ノード宛へのメッセージを生成し送信する。このメッセージには、一方通行開始ノードが一方通行終了ノードへの経路の計算を実現するために、一方通行終了ノードのもつ **Hello** カウントテーブルの情報が搭載される。さらにこのメッセージには、一方通行開始ノードが 1 ホップ先を一方通行終了ノードとする 1 キャリヤノードを把握するために、一方通行終了ノードのもつ **Statistic** テーブルの情報も搭載される。この情報は、車両が一方通行開始ノード n_1 、一方通行終了ノード n_0 を順に通過した後、最も高確率で到達する 1 ホップ先ノード n_2 への確率、つまり確率 $p(n_1, n_0, n_2)$ をメッセージに搭載する。このメッセージを一方通行開始ノードが受信することで、1 ホップ先を一方通行終了ノードとした 2 ホップまでの 1 キャリヤノードを把握することができる。このメッセージは、前述のメッセージセットの内容とは異なり、パケットと同様に経路情報を利用して 3.6 節コウで説明した処理手順に従い一方通行開始ノードまで届けられる。

このメッセージに搭載される情報を、図 6 と表 2 の例を用いて説明する。 N_2 は、 N_3 を一方通行開始ノードであると特定し、 N_3 までの経路を把握しているとする。 N_2 は、 N_3 宛のメッセージを生成する。このメッセージに表 2 の **Hello** カウントテーブルの情報を搭載する。これに加えて表 2 の **Statistic** テーブルから 1 ホップ前ノード N_3 から自身

を通過した後、最も高確率で到達する 1 ホップ先ノード N_1 への確率 $p(N_3, N_2, N_1)$ をメッセージに搭載する。

4.4 一方通行終了ノードへの経路計算

一方通行開始ノードは、一方通行終了ノードが生成したメッセージを受信し 3.4 節で説明した、処理により一方通行終了ノードへの経路の計算、並びに 1 ホップ先を一方通行終了ノードとした 2 ホップまでの 1 キャリーノードを把握する。これにより一方通行開始ノードは、パケット転送において一方通行道路を経路として選択することができる。この処理を図 6 の例を用いて説明する。 N_3 は、 N_2 が生成したメッセージを受信することにより、自身の 1 ホップ前ノードである N_4 または N_6 から自身 N_3 を通過して N_2 に車両が到達する確率 $p(N_4, N_3, N_2)$ 、 $p(N_6, N_3, N_2)$ を計算する。並びに N_3 は、 N_2 の Statistic テーブルの情報である確率 $p(N_3, N_2, N_1)$ を把握し、 $p(N_4, N_3, N_2)$ を知っているのので、 N_4 から来た車両が N_1 に到達する確率 $p(N_4, N_3, N_1) = p(N_4, N_3, N_2) \times p(N_3, N_2, N_1)$ を計算できる。この確率がしきい値 CP_{min} より高い値の場合 N_3 は、 N_1 を 1 キャリーノードと見なす。

5. シミュレーション評価

5.1 評価環境

提案手法の性能を評価するため、シミュレーション評価を行った。プログラミング言語 C++を用いてシミュレータを作った。車両のモビリティモデルは、トラフィックジェネレータ SUMO[9]を用いて作成した。

5.2 シミュレーションシナリオ

阪口らの手法と比べて提案手法がどの程度の性能を発揮するかを調べるために、シミュレーション評価を行った。シミュレーションは h に示す道路交通網とノード配置で行った。図 7 に示す矢印は一方通行道路を表し、矢印の向きは車両が進行する方向を意味する。ノードとノードの間隔は 300m の 3×4 格子状の信号を設置していない道路である。道路は全て 3 車線で右左折専用道路は設けない。

車両は道路端 1~14 で発生する。発生した車両は、最高速度 50km/h で走行し、交差点到達時に以下の 3 パターンで進行する。三方向に進行できる場合は、90%の確率で直進し 5%の確率でそれぞれ右折、左折する。直進できない場合は、50%の確率で右左折する。右折または左折片方ができない場合、95%の確率で直進し 5%の確率で曲がる。車々間の通信範囲は 50m で、交差点に到達した車両はノードとパケットとメッセージの交換を行う。車両のパケット搭載上限を 50 個、ノードのパケット搭載上限を 100 個、1-Carry メッセージと Multi-Carry メッセージの搭載上限を 20 個と設定する。パケットを複製するとき、しきい値となる中継ノードまでの到達確率は 99%とする。つまり、少なくとも 1 つのパケットが 99%以上の確率で中継点まで到達するようにパケットを複製する。シミュレーション時間は 3600 秒である。3.3 節で説明した一方通行開始ノードが一方通行終了ノードへ送信するメッセージをシミュレーション開始 300~3300 秒の 3000 秒間に、300 秒の間隔で発生させる。以上の条件のもと、シミュレーション開始から 600 秒~3000 秒の 2400 秒間に、A, B, C の 3 つのノードを送信元とし I, J, K の 3 つのノードをそれぞれ宛先としたパケットを 500 個ランダムに発生させる。発生する車両台数を毎分 9 台から 47 台まで、約 4 台の間隔で変動させそれぞれの車両台数で 10 回反復試行する。

シミュレーションパラメータを表 4 に示す。

5.3 評価指標

シミュレーション評価によって提案手法が阪口らの手法と比べてどの程度性能が向上したかを知るために、車両密

度を変化させたときに各手法のパケット到達率と平均遅延時間を調べる。パケット到達率、平均遅延時間は、シミュレーション開始からシミュレーション終了までに宛先に到達したパケットから算出する。

5.4 シミュレーション評価

図 8 にパケット到達率を示す。発生車両台数が少ない場合には、阪口らの手法と比べて提案手法の方が高い到達確率となっていることがわかる。提案手法は、一方通行道路を経路として選択しているため、阪口らの手法よりパケットを中継する回数が少ない分パケットを損失する確率が減少していると考えられる。

図 9 にパケットの平均遅延時間を示す。発生車両台数が減少するに従い、提案手法、阪口らの手法ともに平均遅延時間が大きくなることわかる。これは、発生車両台数が少ないほどノードが車両にパケットを送信するまでの待ち時間が長くなるためである。提案手法は宛先まで一方通行道路を利用する経路を選択しているため、阪口らの手法と比べて平均遅延時間が約 30 秒から 60 秒ほど短い値になっている。

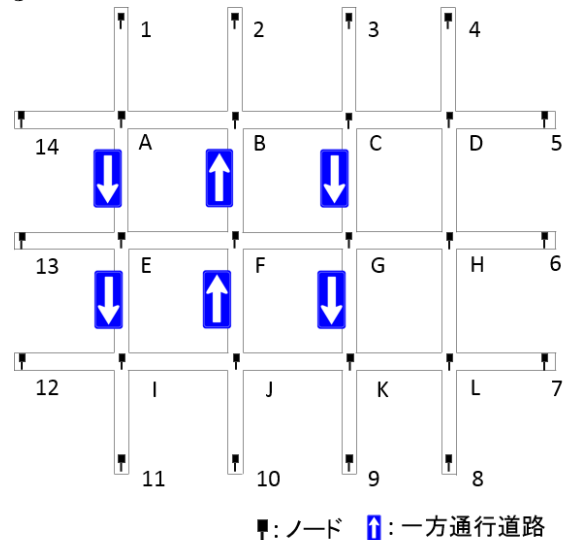


図 7: シミュレーション評価の道路交通網とノード配置

表 4: シミュレーションパラメータ

ノード間隔	300m
信号機	設置しない
道路車線数	3車線
右左折専用道路	設置しない
車両最高速度	50km/h
車両進行確率(直進可、右左折可)	直進: 90%, 右折 左折: 5%
車両進行確率(直進可、右左折一方不可)	直進: 95%, 右左折: 5%
車両進行確率(直進不可、右左折可)	右折 左折: 50%
車両発生場所	道路端1~14
発生車両台数(毎分)	9, 14, 19, 23, 28, 34, 42, 47
パケット送信元ノード	A,B,C
パケット宛先ノード	I,J,K
パケット発生時間	600秒~3000秒
パケット発生個数	500個
シミュレーション時間	3600秒
車両の搭載パケット上限	50個
ノードのパケット搭載上限	100個
1-Carryメッセージ搭載上限	20個
Multi-Carryメッセージ搭載上限	20個

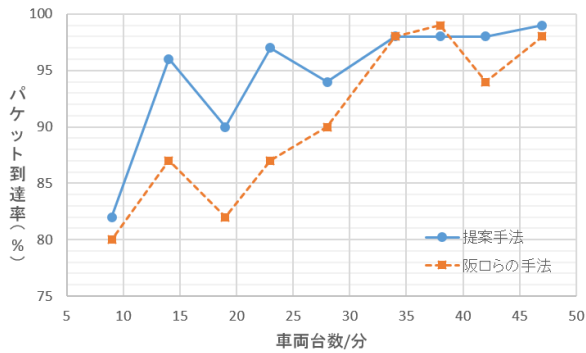


図 8:パケットの到達確率

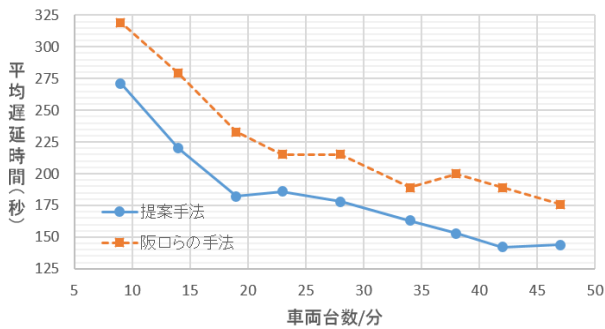


図 9:パケットの平均遅延時間

6. おわりに

本研究では、阪口らの手法を拡張して一方通行道路を経路として選択する手法を提案した。また、自作したシミュレータでその性能を評価した。シミュレーションの評価結果から提案手法は、一方通行道路を含む小規模で単純な道路交通網で、阪口らの手法よりパケットの伝送遅延が約 30 秒から 60 秒短いことを示した。

今後の課題として、今回のシナリオでは宛先までの距離が近い格子状の道路を用いているので、より現実的な道路交通網や交通パターンを用いた評価が必要である。また、車両がノードに到達した際には一定量のデータ通信が保証されるという仮定を本研究では置いているが、現実では周囲の環境に影響を受けデータ通信が失敗する場合もあり得る。このことを考慮したシミュレーションで評価する必要がある。さらに、阪口らの手法以外の先行研究と比べてどの程度性能を発揮するか評価する必要がある。

参考文献

- [1] 津川定之: "高度道路交通システム概論," 日本ロボット学会誌, Vol. 17, NO.3, pp.312-320, (1999).
- [2] ITS サービス(DSRC), 入手先<http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/spot_dsrc/> (参照 2016-01-16).
- [3] VICS, 入手先< <http://www.vics.or.jp/know/about/center.html>> (参照 2016-01-16).
- [4] 間瀬憲一: "車々間通信とアドホックネットワーク," 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J89-B No.6, pp.824-835 (2006).
- [5] 阪口紘生, 吉廣卓哉, 柴田直樹, 伊藤実: "道路交通網上でパケット配送を実現する交通量を考慮した距離バクトルルーティング," 第 21 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2013), pp201-209 (2013).
- [6] Brad Karp, H. T. Kung. "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks," Proc. Proceedings of the 6th annual interna-

tional conference on Mobile computing and networking (Moi-Com2000), pp216-254 (2000).

- [7] Jing Zhao, Guohong Cao, "VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, NO. 3, pp.1910-1922 (2008).
- [8] Yong Ding, Li Xiao, "SADV: Static-Node-Assisted Adaptive Data Dissemination in Vehicular Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 59, NO. 5, pp.2445-2455 (2010).
- [9] SUMO: Simulation of Urban Mobility, 入手先<http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/>(参照 2016-01-16).