

道路交通網上でパケット配送を実現する 距離ベクトルルーティング

阪口紘生^{†1} 吉廣卓哉^{†2} 柴田直樹^{†1}

近年、車社会の発展に向けて車同士が自律的にネットワークを構築する VANET に関する研究が盛んに行われている。VANET では位置情報を利用しルーティングを行うジオメトリックルーティングが多く利用されるが、ジオメトリックルーティングでは通信を確立するために一定以上の車両密度が必要であり、車両密度の低い郊外での使用は難しい。しかし、広い範囲の道路での通信を実現するためには都市部であっても郊外であっても一様に動作するシームレスなルーティングプロトコルが望まれる。本研究では、車両密度に影響を受けずにパケットを配送するため、路上に設定された無線基地局間で車両を伝送媒体としてパケットを転送する新たなネットワーク形態を提案し、そのネットワーク上でルーティングを行う距離ベクトルルーティング手法を提案する。

A Reliable Routing in Vehicular Networks using Roadside Boxes

Hiroki Sakaguchi^{†1} Takuya Yoshihiro^{†2} Naoki Shibata^{†1}

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]。日本では現在、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、これらシステムにより通信範囲を拡大し、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。

そこで近年、低コストに通信範囲を拡大できる手法として、車両同士がその場で自律的にネットワークを構築し、マルチホップ通信を行う VANET (Vehicler Ad-hoc NETWORK) に関する研究が盛んに進められている[4]。種々のサービスを提供するために VANET で検討されているパケット配送問題は、ブロードキャストとユニキャストに分類される。ブロードキャストは、パケットを、情報発信位置の周囲一定範囲にある車両に広告する問題である。ユニキャストは、道路網上の指定した位置を宛先として、その位置（またはその周囲）にいる端末にパケットを届ける問題である。

本研究では後者を扱うが、ユニキャストルーティングにおいては、多くの場合、GPS などから位置情報を取得し利用するジオメトリックルーティングが使用される[5][6]。しかし、ジオメトリックルーティングでは道路内の車両密度

が低い場合には VANET 上で宛先までの接続性を確保することができず、従って、車両密度が低い郊外ではパケットを宛先まで転送することが難しい。周辺にパケットを転送できる車両が存在しない場合でもパケットが破棄されることを防ぐために、Carry and Forward を用いる手法[7]も提案されているが、依然として車両密度が一様に低い郊外では宛先までパケットを転送することは難しい。

本稿ではこの問題点を解決するため、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新たなネットワークの形態を提案する。提案するネットワーク上では、パケットが発生すると、まず近隣の基地局に送られる。その後、パケットは車両によって宛先により近い基地局に配送されることを繰り返し、複数の基地局に中継されて、最終的には宛先となる基地局に配送される。本稿では、伝統的な距離ベクトルルーティングをこのような道路交通網ネットワークに適用することで、基地局間の信頼性のあるパケット配送を実現する。

固定の無線基地局の設置には多少のコストがかかるが、一般的に大きなコストがかかるのは有線ネットワークへの接続であり、交差点への Wifi 等の無線機器の設置は比較的安価で済む。提案手法は、比較的成本をかけずに、車両密度が高い都市部から車両密度が低い郊外までをシームレスに接続できる広域車両ネットワーク網の実現を目指す。

本論文の以下のように構成される。2 章では提案手法に関連する研究の説明を行う。3 章では提案手法である道路交通網上での距離ベクトルルーティング手法について述べ、4 章では提案手法をシミュレーション実験により、提案手法の評価を行い、5 章でまとめる。

^{†1} 奈良先端技術科学大学院大学
Nara Institute of Science and Technology (NAIST)

^{†2} 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

2. 関連研究

VANET におけるルーティングでは車両特有の高いモビリティや、道路に沿って移動するという移動特性を考慮することでより効率的にルーティングが可能となる。

ジオメトリックルーティングの代表的な手法の一つに GPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing)[5]がある。GPSR とは、ノードが位置情報から宛先に最も近いノードにパケットを転送してゆき、自身が最も宛先に近い場合には右手法により迂回路を探索する手法である。しかし、GPSR をそのまま VANET に適用すると、道路脇の建物が電波の遮蔽物となり、パケットが宛先まで転送されないという問題点が存在する。この問題点を解決するため、Lochet らは交差点内で経路選択を行う GPCR(Greedy Perimeter Coordinator Routing)[6]を提案した。GPCR では交差点内に存在する車両を、無線通信範囲内に存在する車両の密度から推定し優先的にパケットを転送する。交差点内の車両は、宛先に最も近い車両に対してパケットを転送し、自身より宛先に近い車両がなかった場合には GPSR と同様に迂回路を探索する。これにより、交差点毎に道路に沿った経路選択を行うことができる。しかし、GPCR では車両の移動に伴ったリンク切断が頻発し、通信を確立するためには一定以上の車両密度が必要となる。

VADD(Vehicle Assisted Data Delivery)[7]は、パケットを転送可能な車両が付近に存在しない場合、車両がパケットを保持したまま移動し、パケットを転送可能な車両を発見するとパケットの転送を再開する Carry and Forward と呼ばれる手法を用いてリンク切断によるパケットの破棄を防ぐ手法の一つである。VADD では、車両はあらかじめ各道路を走行する車両の密度や速度に関して統計的な情報を取得できることを前提とし、交差点においてそれら情報から遅延が最小となる経路を推定し、パケットの転送をおこなう。しかし、VADD においても道路全体の車両密度が低ければ宛先までパケットを転送することは難しいと考えられる。

このように、市街地など一定以上の車両密度を想定したルーティングプロトコルは多く提案されているが、市街地であっても著しく車両密度の低い郊外であっても一様に利用可能なルーティング手法はあまり提案されていない。しかし、広い範囲の道路で通信を実現するためには、車両の粗密に影響を受けず、都市部であっても郊外であってもシームレスに通信可能な手法の存在が望ましい。

3. 道路交通網上での距離ベクトル経路制御

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、主要な幹線道路の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。車両はあくまで通信媒体として

振る舞い、車両間では直接通信は行わない。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 WiFi のように通信範囲が数十～数百メートル程度ある方式を想定する。また、車両がノードに到達した時には、ノードと車両間で、最低でも数 kBytes の通信が可能なものとする。

3.2 定義

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しているノードと定義する。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、例えばノード 6 に対してノード 2, 5, 7, 10 が隣接するノードとなる。またあるノード S からあるノード D に至るまでに車両が遭遇するノードの数をホップとして定義する。たとえば、図 1 ではノード 1 からノード 4 までは 3 ホップとなる。ノード S からノード D に到達するまで何台の車両が必要かを表す距離をキャリアという単位で定義する。例えば、図 1 において、ノード 1 からノード 16 まで図内矢印のとおり到達可能ならば、ノード 1 からノード 16 までは 2 キャリアの距離である。

3.3 提案手法の概要

提案手法は、距離ベクトル型経路制御アルゴリズムに基づく。提案手法では、まず各ノードが、高確率で 1 台の車両（つまり 1 キャリア）で到達できるノードを発見する。

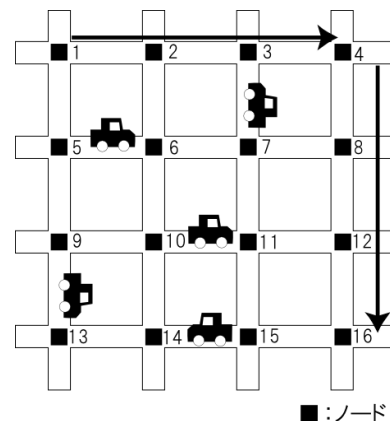


図 1: 想定する路上交通網とノード配置の一例

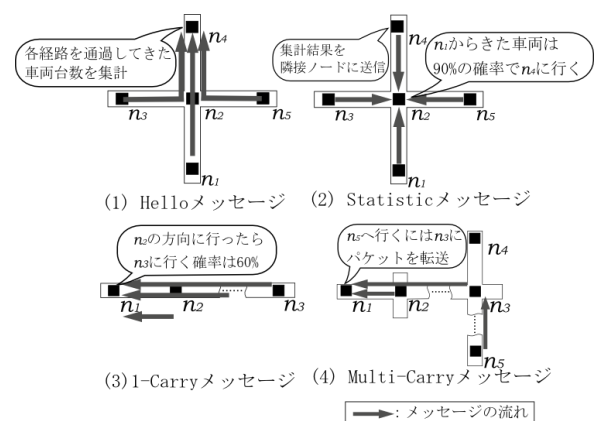


図 2: 各メッセージによって得られる情報

その後、車両を用いてその情報を交換し合うことで、自身から車両複数台で到達可能な宛先ノード、宛先ノードに到達するため中継ノードとするべき1キャリーのノード、その距離(キャリー数)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

Hello メッセージは、図 2(1)のように、あるノードに車両が到達したとき、その車両が2ホップ前、1ホップ前に通過してきたノードの組に対して、一定時間内にそれぞれのノードの組を通過して自身に到達した車両が何台存在するかを知るために送信する。

Statistic メッセージでは、図 2(2)のように各ノードが Hello メッセージを集計した結果を隣接するノードに広告する。全隣接ノードから Statistic メッセージを受信したノードは、図 2(2)の n_2 のようにある1ホップ前ノードを通過し自身に到達した車両が、次にある1ホップ先ノードに向かう確率を計算できる。

1-Carry メッセージは、図 2(3)のように、Statistic メッセージにより把握した確率を広告する。これにより図 2(3)の n_1 のように、各ノードは複数ホップ離れたノードに到達する確率を計算できる。また、各ノードは車両一台で高確率で到達可能なノードを1キャリーノードとして採用する。

Multi-Carry メッセージは、1-Carry メッセージで知り得た1キャリーノードの情報を図 3(4)のように他のノードに広告してゆく。これにより、各ノードは図 3(4)の n_1 のように、車両複数台で到達可能なノードを把握できる。

パケットの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際、ノードは自身の持つ経路表から、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、車両がやってきた方向を Hello メッセージの持つ1ホップ前のノードのアドレスにより識別し、中継ノードまで移動する可能性の高い車両を用いてパケットを配送する。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、一定以上の到達率が確保できるようパケットを複製し送信する。中継ノード到達時には同様に、新たな中継ノードに向かう車両を選定し、パケットを複製、送信する。これにより複数のノード、車両を利用したマルチホップ通信を実現する。

3.4 ノードに到達した時の車両の動作

車両がノードに到達した際、まず車両はノードに対して

メッセージセット			
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
		1-Carryメッセージ	Multi-Carryメッセージ
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
		⋮	⋮

図 3:制御メッセージセット

制御メッセージセットを送信する。なお、制御メッセージセットのフォーマットについては後述する。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。それぞれの制御メッセージを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。制御メッセージセットを交換した後、車両がデータパケットを保持していた場合には、到達したノードが中継点ノードあるいは宛先ノードであるパケットをすべてノードに送信する。さらにノードは、自身の送信キューにパケットが存在するのであれば、到達した車両が保持できるだけのパケ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(図 3)。送信される各メッセージの数は、往路と復路で異なる。車両がノードに到達した際、ノードから車両に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り、定数として定義される。つまり、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渡されることとなる。車両からノードに新たに渡されるメッセージセットは、Hello メッセージ2個、Statistic メッセージ1個、1-Carry メッセージ $N_{encount} + 1$ 個、Multi-Carry メッセージ $MC_{send} \times (N_{encount} + 1)$ 個である。1-Carry メッセージと、Multi-Carry メッセージの車両への最大積載数を制限することで、帯域の圧迫を防ぐことができる。これにより、車両からノード、ノードから車両に渡される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。

3.5 Hello メッセージ処理

Hello メッセージは車両がノードに到達したときにノードによって生成され、生成ノードのアドレスを保持する。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、これによって、各ノードは2ホップ以内にあるノードの存在を把握することができる。

車両がノードに到達すると、車両は搭載されている全ての Hello メッセージをノードに送信し、逆にノードは自分が生成した Hello メッセージを車両に送信する。Hello メッ

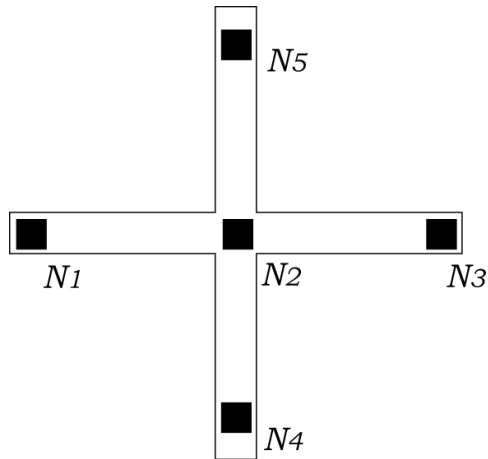


図 4:道路交通網とノード配置の例(1)

セージは、ノードから受け取ったあと、2 回ノードに到達したあとに削除される。つまり、1 台の車両には常に 2 つの Hello メッセージが保持される。

ノードは、車両から Hello メッセージを受信すると、これを数えることで交通量を測定する。車両は通常、1 ホップ前と 2 ホップ前のノードが生成した 2 つの Hello メッセージをノードに送信する。従って、これらの Hello メッセージを受信したノードは、車両がそのノードに到達する 2 ホップ前までの経路を集計できる。2 ホップ前までの経路の集計には、Hello カウントテーブルを用いる。Hello カウントテーブルは、任意の 2 ホップ前ノードアドレス n_2 とそれに隣接する 1 ホップ前ノードアドレス n_1 、そして自身 n_0 の組に対して、過去 t 時間にそれらを通り抜けてこのノードに到達した車の台数（通過車両数） $c(n_2, n_1, n_0)$ を保持する表

である。Hello カウントテーブルは、次節で説明する 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。Hello カウントテーブルは、2 ホップ前のノードアドレスと 1 ホップ前のノードアドレスの組に対して通過車両数をカウントするため、そのエントリ数はノードから 2 ホップ先に存在するノード数となる。

Hello メッセージによって Hello カウントテーブルが生成される様子を例を用いて説明する。図 4 に道路交通網と設置されたノードの位置の例を示す。ここで、車両がノード N_1 , N_2 , N_3 と移動したとする。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。これらのメッセージを車両は N_3 に送信する。 N_3 は自身の Hello カウントテーブルの中から、受信した Hello メッセージの組である N_1 , N_2 に対応した通過車両数を 1 だけ加算する。その後、2 ホップ前のノードである N_1 の生成した Hello メッセージを削除し、自身が生成した Hello メッセージと 1 ホップ前のノードである N_2 の生成した Hello メッセージを車両に送信する。同様に、 N_4 , N_2 , N_3 と車両が移動してきたなら、 N_3 は自身の Hello カウントテーブルの N_4 , N_2 の組に対応する通過車両数が 1 だけ加算される。これらの動作に

よって、各ノードは 2 ホップ以内に存在するノードを把握し、2 ホップ前、1 ホップ前ノードの組を通り抜けてきた車両数を集計することができる。

3.6 Statistic メッセージ処理

Statistic メッセージは、あるノードに車両が到達したときに、その車両が次にどの 1 ホップ先のノードに到達する確率が高いかを把握するために用いられる。車両は交差点を直進する可能性が高いと考えられるため、直前に到達したノードがわかれば、次に到達する可能性が高いノードを高い確率で推定できる。

Statistic メッセージには、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持つ全ての情報が含まれる。車両がノードに到達すると、車両は保持する 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渡す。この処理によって、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。

Hello カウントテーブルには、2 ホップ前のノード n_2 、1 ホップ前のノード n_1 、そして自分 n_0 の組に対して、その経路を通った車の台数 $c(n_2, n_1, n_0)$ が記録されている。このデータを隣接ノードから受け取ることで、各ノードは、任意の隣接ノードの組 n_{11}, n_{12} に対して、 n_{11} から来て自身 n_0 に到達し、次に n_{12} に到達した車両が、過去一定時間内に何台あったかを把握できる。つまり、 n_{11} から来て n_{12} に到達した車両の台数 $c(n_{11}, n_0, n_{12})$ を、 n_{11} から来た車両の合計台数 $\sum n_{11} \{c(n_{11}, n_0, n_{12})\}$ で割ることで、 n_{11} から来た車両が次に n_{12} に到達する確率 $p(n_{11}, n_0, n_{12})$ を計算できる。任意の隣接ノードの組に対するこの確率を、各ノードにおいて Statistic テーブルで保持する。

Statistic メッセージにより、Statistic テーブルが生成される様子を図 4 の例を用いて説明する。図 4 において、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 の生成した Statistic メッセージを受信することで $c(N_3, N_2, N_1)$ を知ることができる。同様に N_4 , N_5 から $c(N_3, N_2, N_4)$ と $c(N_3, N_2, N_5)$ が記載された Statistic メッセージを受信すると、 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 に到着した車両数を知ることができる。同様に、 N_2 は全ての 1 ホップ前ノードに対して、次にどの 1 ホップ先ノードに至るかを確率的に把握できる。

3.7 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知るために用いられるメッセージである。1-Carry メッセージには Statistic メッセージから得られた、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おり、1-Carry メッセージを受信したノードは、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手がかりとすることができる。

図5を用いて1-Carryメッセージの動作を説明する. 車両が n_1 を通って 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 と n_2 を通ったときに, 最も到達確率が高い次ホップノード n_3 , すなわち $\text{argmax}_{n_3} \{p(n_1, n_2, n_3)\}$ を検索し, その逆向きの移動確率, つまり $p(n_3, n_2, n_1)$ 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, これらから, 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-Carryノードに対する到達確率を到達確率の積として計算できる. 各ノードは, これらの1-Carryノードに対する到達確率を, 1-Carryテーブルに格納しておく. なお, この確率が, しきい値 CP_{min} より低い場合には, 高確率でパケットの到達を見込めないことから, 1-Carryテーブルにエントリを追加せず, その宛先を1-Carryノードとは見なさない. 1-Carryテーブルでは各1キャリアノードまでのホップ数, 到達確率, 方向(次ホップ)を管理する.

改めて1-Carryメッセージの処理を述べる. 車両がノードに到達すると, 車両は保持する全ての1-Carryメッセージをノードに送信する. ノードは新たなホップに対する1-Carryメッセージを生成し, 車両に送信する. またこのとき, 1-Carryメッセージの数が C_{max} であれば, ランダムに1つの1-Carryメッセージを削除し, 車両に送信する1-Carryメッセージの数が C_{max} を超えないようにする. ノードは, 保持する1-Carryメッセージから, 各ノードへの到達確率を計算し, これが定数 CP_{min} 以下であれば, そのノードを到達ノードとする1-Carryメッセージを削除する. すなわち, 1ホップ前ノードが n_4 , 現在のノードが n_3 なら, n_3 は任意ノード n に対する到達確率 $p(n_4, n_3, n)$ を計算し, これが計算できない, あるいは CP_{min} 以下であれば, 対応する1-Carryメッセージを削除する.

1-Carryメッセージにより1-Carryテーブルが生成される様子を図6の道路交通網とノード配置の例を用いて説明する. 図6において, 車両がノード N_1, N_2, N_3, N_4 と移動する. N_2 到達時, N_2 のもつStatisticテーブルにおいて1ホップ前ノードである N_1 に対し, 最も到達する可能性の高いノードが N_3 であったなら, 生成される1-Carryメッセージは図7の1行目のエントリの様になる. 同様に N_3 到達時, N_3 のもつStatisticテーブルにおいて, 1ホップ前ノードである N_2 に対し, 最も到達する可能性の高いノードが N_4 なら, 生成される1-Carryメッセージは図7の2行目のエントリの様になる. 車両が N_4 に到達した. このとき, N_4 のもつStatisticテーブルにおいて, 最も N_3 に到達する可能性の高い1ホップ前ノードが N_5 であったなら, N_4 は N_2 に対する到達確率である $p(N_5, N_4, N_2) = p(N_5, N_4, N_3) \times p(N_4, N_3, N_2)$ を求めることができる. 同様に, N_1 に対する到達確率 $p(N_5, N_4, N_1) = p(N_5, N_4, N_2) \times p(N_3, N_2, N_1)$ を求めることができる.

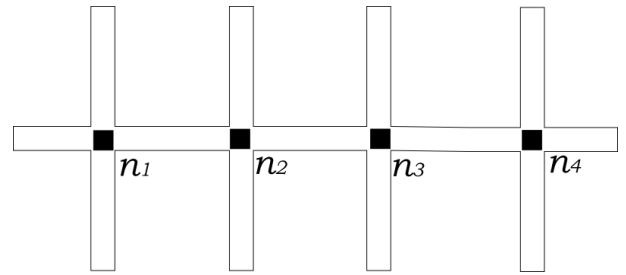


図5: 道路交通網とノード配置の例(2)

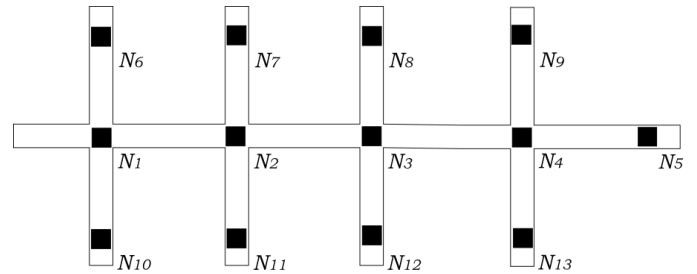


図6: 道路交通網とノード配置の例(3)

1ホップ前ノード	生成ノード	1ホップ先ノード	逆向きに進む確率
N_1	N_2	N_3	$p(N_3, N_2, N_1)$
N_5	N_3	N_2	$p(N_4, N_3, N_2)$

図7: 1-Carryメッセージ

求めた到達確率 $p(N_5, N_4, N_2)$, $p(N_5, N_4, N_1)$ が設定されたしきい値 CP_{min} 以上であれば, 1-Carryテーブルに登録, または到達確率を更新する.

3.8 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送信されるメッセージである. Multi-Carryメッセージには複数の宛先が含まれており, それらの各宛先に到達するための経路情報が書かれている. 経路情報は, 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ア数を含む. 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.

提案手法は距離ベクトル型経路制御に基づいて設計されるが, 通常距離ベクトル型経路制御方式とは異なり, 本研究では車両によるパケット配送を想定している. 車両による配送においては道路形状を考慮しなければならないため, 同じ仕組みを用いることは出来ない. 図8に一般的な距離ベクトルルーティング方式を適用した例を示す. ノード n_1 が生成した経路情報が, n_2 に届き, 宛先 n_d に対して n_1 から距離が1キャリアであると記載されているとする. n_2 は距離を1キャリアだけ増加して距離情報を広告する, この経路情報を, n_3 のように, n_1 に到達するためには n_2 を中継しなければならないノードが受信した場合には問題は生じない. しかし, n_4 のように n_1 まで1キャリアで到達できるノードが受信した場合には, 中継ノードに n_2 を指定す

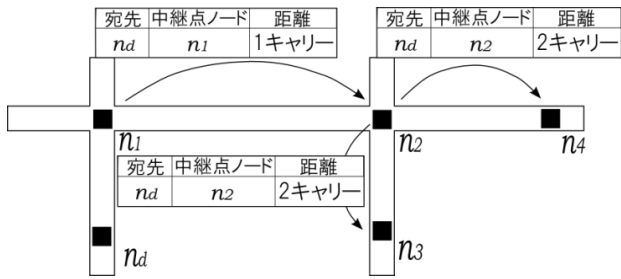


図 8:一般的な距離ベクトル型ルーティングの場合

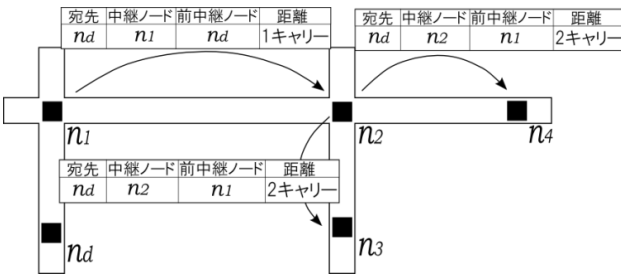


図 9:提案手法の場合

るよりも、 n_1 を指定してパケットを直接配送の方が効率的である。本研究の環境では、1 キャリアの距離に数ホップ以上のノードが含まれることもあり、この問題による効率の悪化は無視できない。

この問題を解決するために、提案手法では、Multi-Carry メッセージに、「中継ノード」および「前中継ノード」の値を保持させる(図 9)。中継ノードにはメッセージを発行したノードの ID が格納され、前中継ノードには前中継ノードがそのメッセージを発行する元となった経路情報を発行したノードの ID が格納される。このメッセージによって、 n_4 は、前中継ノード n_1 が 1 キャリアの距離にあれば n_1 に直接パケットを送ることが可能となる。

Multi-Carry メッセージの正規な処理手順を以下に示す。なお経路情報は、 $(n_d, n_i, n_p, dist)$ で表し、 n_d は宛先、 n_i は中継ノード、 n_p は前中継ノード、 $dist$ はキャリア数を表す。

- 1) Multi-Carry メッセージを受信したノードは、含まれる各距離情報 $(n_d, n_i, n_p, dist)$ に対して、以下の処理を行う。
- 2) 経路表を参照し、宛先 n_d に対する距離が $dist$ より大きければ、次の経路情報の処理に移る。
- 3) 経路情報の前中継ノード n_p が自身の 1 キャリアノードであれば、宛先を n_d 、中継ノードを n_i 、前中継ノードを自身、距離を $dist$ として経路情報を発行し、保存する。また、 n_p を n_d に対する中継ノードとして経路表に登録する。
- 4) 経路情報の前中継ノード n_p が自身の 1 キャリアノードでなければ、宛先を n_d 、中継ノードを自分、前中継ノードを n_i 、距離を $dist+1$ とした経路情報を発行し保存する。また、 n_i を n_d に対する中継ノードとして経路表に登録する。

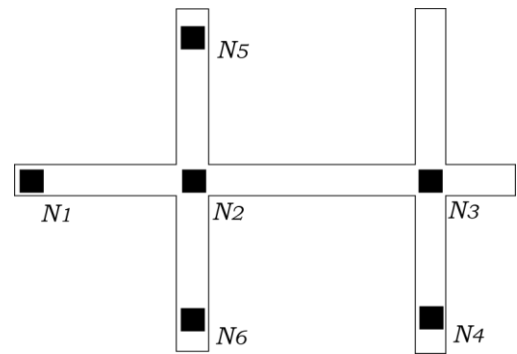


図 10:道路交通網とノード配置の例(4)

宛先ノード	中継点ノード	前中継ノード	キャリア数
N_1	N_2	N_1	1
N_5	N_2	N_5	1
N_4	N_2	N_4	1

図 11: N_3 に送信された経路情報

宛先ノード	中継点ノード	前中継ノード	キャリア数
N_1	N_3	N_1	1
N_5	N_3	N_2	2
N_4	N_3	N_2	2

図 12: N_3 において整形後の経路情報

車両がノードに到達すると、車両は保持しているすべての距離情報を Multi-Carry メッセージとしてノードに送信する。これに対してノードは、上記の受信処理を行った後、保持している経路情報からランダムに MC_{send} 個を選択し、処理を行ったメッセージに加え Multi-Carry メッセージとして車両に送信する。なお、ここでの経路情報は Multi-Carry メッセージとして受け取った情報の他に、自身の 1-Carry テーブルのもつ 1 キャリアノードへ対する情報を含む。車両が保持する Multi-Carry メッセージの数が上限数 MC_{max} を超えた場合には、ノードに到達する前から保持する経路情報をランダムに削除し、保持する経路情報の数が MC_{max} になるようにする。

Multi-Carry メッセージにより、経路表が構築される様子を図 10 の道路交通網とノード配置の例を用いて説明する。図 10 に示す道路交通網とノード配置において、いまある時刻に、車両が N_2 を経て、 N_3 に到達した。このとき、車両には図 11 のような経路情報が搭載されているとする。 N_3 は受信した経路情報に対して、前述の処理手順に従い処理を加える。図 12 に処理後の経路情報を示す。さらに、図 11 の経路情報から N_3 は、 N_5 に対する中継ノードが N_3 であり、距離が 2 であるという情報がわかるので、これを自身の経路表に登録する。

3.9 パケットの配送

提案手法では、パケットは全て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は、車両が最初に遭遇したノードにパケットを渡す事を実現することができる。

ノードは隣接するノード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点ノードに対してパケットを送信するとき、中継点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。

3.8節までに説明した動作により、各ノードは経路表を作成できた。ある時刻に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、一致したレコードの中継点アドレス、ホップ数をパケットの中継点アドレスフィールド、TTLフィールドに書き込む。さらに、ノードの持つ1-CarryテーブルとStatisticテーブルから、中継点ノードまでの到達確率が最も高い1ホップ前ノードを特定し、対応する送信キューにエンキューする。このとき、パケット到達率を向上させるため中継点ノードまで少なくとも1つのパケットが C_{prob} 以上の確率で到達するようにパケットの複製個数を決定し複製する。

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点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。なお、到達したノードが中継点ノードでも宛先ノードでもなく、TTLが0となった場合、これは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、自身が中継点ノードであれば、前述の動作と同様に中継点、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ホップ前のノードを特定し、対応するキューにパケットがあれば車両にパケットを送信する。なおこのとき、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。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。

実際に発生したパケットを宛先まで配送する様子を例を用いて説明する。図10の道路交通網とノード配置において、 N_2 が図13に示す情報を持っているとする。ある時刻において、 N_2 で N_4 を宛先としたパケットが発生した。このとき、 N_2 の持つ経路表から、パケットの中継点ノードが N_3 であることがわかる。さらに、1-Carryテーブルの次ホップとStatisticテーブルから中継点ノード N_3 の方向に向かう車両が最も多い1ホップ前通過ノードが N_1 であることがわかる。よって、パケットを N_1 用のキューにエンキューする。

ルーティングテーブル

宛先ノード	中継点ノード	キャリア数
N_1	N_1	1
N_3	N_2	1
N_4	N_3	2
⋮	⋮	⋮

1-Carryテーブル

宛先	1ホップ先ノード	到達確率	ホップ数
N_1	N_1	90%	1
N_3	N_3	90%	1
N_6	N_6	90%	1
N_3	N_3	90%	1
⋮	⋮	⋮	⋮

Statisticテーブル

宛先ノード	1ホップ先ノード	到達確率
N_1	N_1	90%
N_5	N_3	5%
N_6	N_3	5%
⋮	⋮	⋮

図13: N_2 のもつ各種情報

いま、ある時刻において車両が N_1 を経て N_2 に到達したとする。このとき、ノードは車両から受信したHelloメッセージから、1ホップ前ノードが N_1 であることがわかり、この車両は N_3 に向かう確率が高いため、車両にパケットを送信する。車両が N_4 に到達したとき、ノード N_4 は自身が中継点ノードであるため、次の中継点ノードを決定し、中継点ノードに向かう確率が最も高い1ホップ前通過車両用のキューにパケットをエンキューする。これらの動作を繰り返すことで、宛先ノードまでマルチホップにパケット送信を行うことができる。

4. シミュレーション評価

4.1 実験環境

本研究において提案する道路交通網上での距離ベクトルルーティング手法の性能を評価するため、シミュレーション実験を行った。シミュレーション実験の実施にあたり、プログラミング言語C++を用いてシミュレータを自作した。

4.2 シミュレーションシナリオ

提案手法が、まずは小規模かつ単純な道路交通網とノード配置においてどの程度性能を発揮できるかを知るため次の条件のもとシミュレーション実験を行った。

実験は図14に示す道路交通網とノード配置により行った。シミュレーション実験では、車両は図14の m_1 から m_{16} の16の道路端からランダムに発生する。発生頻度は、 $\frac{5}{16}$ 秒に1台であり、つまり、ある道路端に注目すると平均5秒に1台の車両が発生する。また、車両は時速50kmで走行し、交差点到達時には90%の確率で直進し、5%の確率で右左折するものとする。車両はデータパケットを512kBytes搭載可能であり、1-Carryメッセージ搭載上限数 C_{max} は10、Multi-Carryメッセージ搭載最上限数 MC_{max} は20とする。ノードは16384kBytes、つまり、パケット32個分を保持できるキューを隣接ノードの個数だけ持つものとする。また、パケットを複製するときしきい値となる中継点ノードまでの到達確率 C_{prob} は90%とする。つまり、少なくとも1つのパケットが90%以上の確率で中継点まで到達するようパケットを複製し、配送する。

以上の条件の下、シミュレーション開始から300秒～

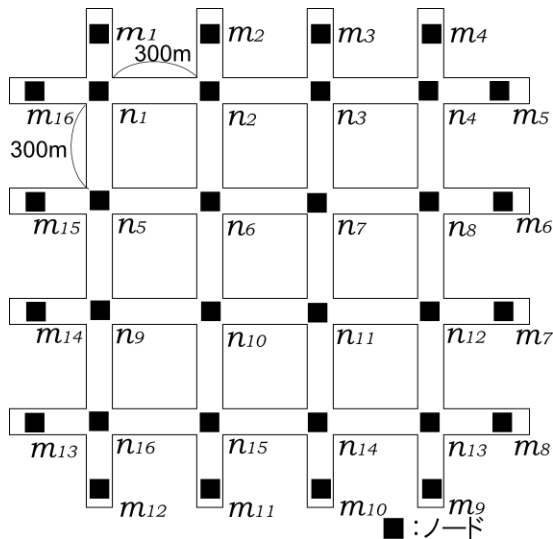


図 14:シミュレーション実験の道路交通網とノード配置

1500 秒の 1200 秒間にノード n_1 から n_{16} の 16 のノードからランダムに宛先と送信元を決定しパケットを発生させる。シミュレーションは、ネットワーク全体の総送信レートを 256kBps から 2816kBps まで 256kBps 間隔で変動させ、それぞれの総送信レートのとき 10 回反復試行する。

4.3 本実験における評価指標

シミュレーション実験によって提案手法がネットワークに対する負荷をどの程度許容できるかを知るため、パケット到達率、ネットワーク全体の総受信レート、平均遅延時間を調べる。また、 C_{prob} を 90% としたときネットワーク全体でどの程度パケットが複製されるかを知るためパケット複製率を調べる。各評価指標は通信が安定して行われている間に計測する必要がある。よって、パケット到達率、平均遅延時間、パケット複製率は、パケット発生から 300 秒後から 900 秒後の 600 秒間に送信されたパケットから算出し、総受信レートは、パケット発生から 300 秒後から 900 秒後の 600 秒間に宛先に到達したパケットから算出する。

4.4 シミュレーション実験結果

図 15 にパケット到達率を示す。総送信レートが 1024kBps までのときには、パケット到達率は C_{prob} の設定値である 90% に近い値を達成できている。1024kBps を超える総送信レートでは徐々に到達率が減少するが、これは、ネットワークが飽和し、パケットの損失が生じたためである。

図 16 に総受信レートを示す。ネットワーク全体の総受信レートは、送信レートが低いときは送信レートに対して線形に上昇するが、ネットワークが飽和すると上昇率が徐々に下がることがわかる。図 17 はパケットの到達遅延時間の平均を表し、ネットワークが飽和する少し前から急激に上昇することがわかる。これは、ネットワーク内のパケットの増加によりパケットの出力キューによる遅延が増加した

ためである。

図 18 にはパケットの複製率を示す。複製率は概ね 3 倍から 4 倍程度であり、総送信レートの変化に関係なく安定して複製されることがわかる。

4.5 考察

まず、本シナリオにおいて設定した各種パラメータの値の下で、制御メッセージセットのサイズは最大でも 1400Bytes であった。つまり、車両がノードに到達した時に交換されるメッセージの大きさは最大でも 1400Bytes の 2 倍である。経路制御にかかるオーバーヘッドとしては十分に小さく、現実的な範囲内と言える。なお、本シナリオでは 1-Carry メッセージ搭載上限数 C_{max} を 10、Multi-Carry メッセージ搭載上限数 MC_{max} を 20 としたが、これを減少させることでオーバーヘッドを下げるのが可能である。これらの値を下げることにより、本経路制御プロトコルが車両の通行量の変化に追従する速度を低下させる影響がある。

パケットの到達確率は、設定した到達率 C_{prob} の値である 90% を概ね達成でき、信頼性のあるパケット転送が可能であることが示された。しかし、実際の到達率はこの値を僅かに下回る結果となった。これは、 C_{prob} が 1 キャリーあたりの達成到達率を表すためである。本シナリオでは、宛先ノードまでのキャリー数は最大で 2 キャリーである。2 キャリーの距離にある宛先ノードに対して保証できる到達率は $90\% \times 90\% = 81\%$ であり、距離が増加すれば到達率も下がる。1 キャリーの到達率ではなく、宛先までの到達確率を設定できる方法が望まれる。

パケットの複製率は概ね 3~4 倍程度で安定しているが、これは、宛先までの距離が概ね 2 キャリーであり、比較的近いためである。提案手法では、次の中継点までの到達確率に応じてパケットの複製を行うため、宛先までの距離に対してパケットの複製数が指数的に増加する。複製数が多いとネットワークの帯域を圧迫し、結果的にスループットが下がる。スケーラビリティの観点から、宛先までの距離にかかわらず複製数が安定するような仕組みを取り入れることが望まれる。宛先までのパケットの到達確率の設定値 C_{prob} とスループットはトレードオフの関係にあるが、このトレードオフが適正に働くためにも、パケット複製数の制御は必要である。

4.6 今後の課題

今後の課題は数多く考えられる。4.5 節に述べたとおり提案手法自体の課題もいくつか挙げられるが、評価に関する課題もある。まず、現在の評価は自作のシミュレータで行っており、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理想的な仮定をおいている。しかし現実には、交換可能なデータ量は周囲の車両数や電波状況に依存して変化し、場合によってはデータ交換に失敗する場合も有り得る。このことを考慮するために、モデル

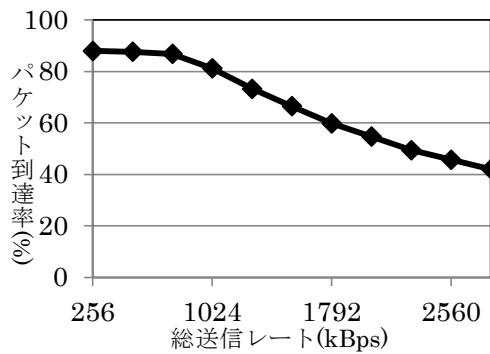


図 15:パケット到達率

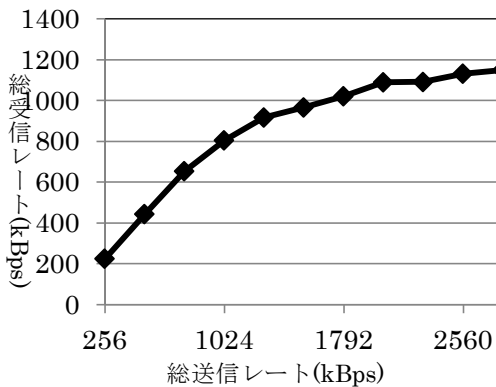


図 16:ネットワーク全体の総受信レート

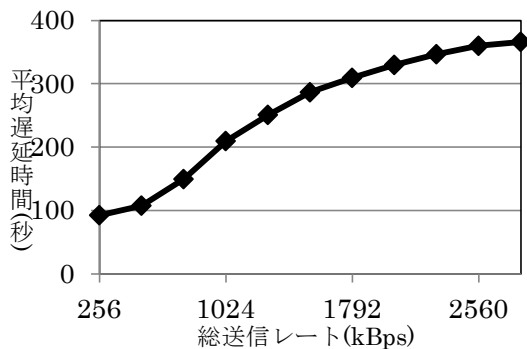


図 17:平均遅延時間

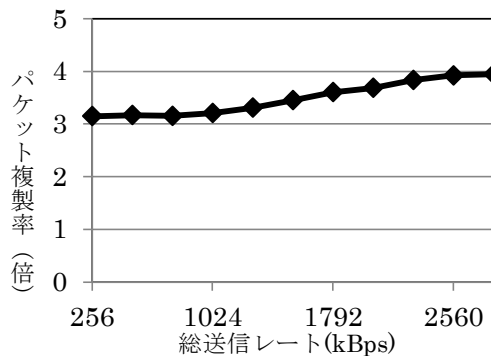


図 18:パケット複製率

に基づいた無線通信シミュレーションが可能なネットワークシミュレータを用いた評価を行いたい。また、現在のシナリオは単純な格子状の道路を用いており、宛先までの距離が近い小規模な道路網であるだけでなく、道路によって車両通行量が異なることも考慮されていない。より現実的な道路網や交通パターンを用いた評価も重要課題である。

5. おわりに

本研究では、道路上に設置された無線基地局間で、車両を伝送媒体としてパケットを転送する新たなネットワーク形態を提案した。また、そのネットワーク上で動作する距離ベクトル型ルーティング手法を提案した。自作したシミュレータにより、提案手法が小規模かつ単純な道路交通網と基地局の配置において発生するパケットが比較的少ない状況では高い到達率を得られることを確認し、固定基地局を用いることで、安定かつ信頼できる基地局間通信が可能であることを示した。

今後の課題として、提案手法のさらなる有効性を評価するため、現実的なシナリオを用いたシミュレーション実験を行うこと、車両の粗密が混在した道路における効率的なルーティング手法の確立があげられる。

参考文献

- 1) 杉本和敏他, “特集: モビリティの進化,” 情報処理 2013 年 4 月号, Vol.54, No.4, pp.288-349 (2013).
- 2) 国土交通省: ITS スポットサービス (オンライン), 入手先, http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/spot_dsrc/index.html (参照 2013-5-10)
- 3) VICS (オンライン), 入手先 (<http://www.vics.or.jp/index1.html>) (参照 2013-5-10)
- 4) G. Karagiannis, O. Altintas, E. Ekici, G. Heijenk, B. Jarupan, K. Lin, and T. Weil, “Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.13, No. 4 (2011).
- 5) Brad Karp, H. T. Kung. : GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks, *Proc. Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom2000)* ,pp216-254 (2000).
- 6) Lochet,C., Mauve, M.,Fusler, H. and Hartenstein,H.: Geographic routing in city Scenarios, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol.9, Issue 1, pp.69-72 (2005).
- 7) Jing Zhao and Guohong Cao, : VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks, *IEEE INFOCOM '06* (2006).