

経路設定情報を利用した車車間メッセージルーティングプロトコルの性能解析

木谷友哉^{†1}

車載カーナビゲーションシステムに設定された目的地情報や、普段の移動経路履歴などを用いることにより、各車両の移動予定経路を高精度で推定可能である。本稿では、数 km 四方程度の領域をカバーする VANET において、領域内の任意の地点間のメッセージを Carry and Forward で宛先まで伝達する複数のルーティングプロトコルの基礎性能解析と考察を行う。対象とするプロトコルは、各車両の位置情報、目的地情報、移動予定経路情報などの利用の有無によって 6 段階にレベル分けする。単純な格子状の道路地図を用意し、その上でメッセージ伝達を行ったときの、メッセージ伝達率を解析する。

A Fundamental Analysis of Message Routing Protocols with Predictable Node Mobility on VANETs

TOMOYA KITANI^{†1}

It can allow a prediction of each car's route-to-go with a high degree of accuracy to use the current preset destination information and the past travel history on the car-navigation system on each car in VANET. In this paper, we analyze carry-and-forward-manner message routing protocols on a VANET with predictable node mobility where the VANET covers a few square kilometers area. We classify the protocols into six groups according to whether each protocol uses position information, destination information and predicted route information of cars, and we evaluate the message delivery ratio of the protocols on a simple grid road map.

1. はじめに

車車間通信ネットワーク (VANET: vehicular ad-hoc networks) は、無線通信機器を搭載する車両によって自律的に作られるネットワークである。VANET は MANET (mobile ad hoc networks) の一種であるが、通信ノードとなる車両の移動性に特徴がある。一般的な MANET では人間の持つ携帯情報端末などがノードとなるため、その移動性として速度は遅いが経路の自由度が高いものが想定される。対照的に VANET では、車両が通信ノードとなり、その車両の移動速度は大きくノード間の接続性の変化が頻繁に起こる。しかし、車両は道路上を移動するため経路に対する制約がきつく将来の移動経路の推定が比較的容易であるという特徴を持つ。また、通信ノードに備えられる機器の大きさや電源について、車両で要求される制約はハンドヘルドデバイスと比較して小さい。

現在の GPS 付きカーナビゲーションシステム (以下カーナビ) は、内蔵する渋滞の統計情報を用いたり、国土交通省の VICS が配信する交通情報を受信したりすることができ、質の高い経路案内を実現している^{1),2)}。日本においてはカーナビの普及率が高く、2007 年現在において新車の 7 割以上に設備されている。しかし、高機能なカーナビは高価であるため、アメリカやヨーロッパ諸国において普及率は高くなかった。近年、GPS 内蔵の携帯電話やスマートフォンなどの普及に伴い、スマートフォン上で動作するアプリケーションとしてナビゲーションが安価で人気を博してきている。そのため、日本のみならず諸外国においても、今後、カーナビ機能のある GPS 付きデバイスを車両に持ち込む機会が増えてくると考えられる。

カーナビに目的地情報が設定されているとき運転手は高い確率で案内された経路上を移動する。また、日常の業務に使用しており、目的地情報が設定されていないときでも、運転者が利用する経路は今までの履歴にある経路であることが多い。このカーナビ内の移動予定経路情報を VANET 内で流通させることで他車両の経路予測も行き、渋滞の回避や、車車間通信における効果的なメッセージ伝播を行えると考えられる。

VANET を用いたサービスとしては、各車両がセンシングした交通情報を流通・収集するプローブや局所的な広告配信などの情報配信サービスが考えられる。現在、自動車メーカー各社がデータセンタを用意し、携帯電話網などの広域無線通信網を介して各車両の位置情報や交通情報を収集・配信するテレマティクスが実用化されてきている³⁾。テレマティクスでは、局所的に流通される情報も全て携帯通信網越しに情報センタを介して配信される。VANET において、各車両が自立的に収集・プローブする情報は、局所的な交通情報であったり、地

^{†1} 静岡大学 若手グローバル研究リーダー育成拠点
Division of Global Research Leaders, Shizuoka University

域の広告情報であったりすることが多い。このような局所的に消費される情報を VANET を用いて流通させることができれば、広域無線通信網の負荷低減やそれともなうサービスを低価格化、局所的な情報を外に極力出さないことによるセキュリティの強化なども期待される。このように VANET がインターネットなどの広域通信網と、ビルや家庭内のプライベートネットワークの間を埋める地域ネットワークの担い手として利用できると考えられる。

文献 4) において、筆者は VANET のみで情報流通を行える環境などについて考察した。また、各車両が装備するカーナビに設定された移動予定経路情報を用いて、近い未来のノード接続可能性グラフを構築することができ、それを利用して効果的なメッセージルーティングができることを述べた。

本稿では、数 km 四方程度の領域をカバーする VANET において、領域内の任意の地点間のメッセージを Carry and Forward で宛先まで伝達する複数のルーティングプロトコルの基礎性能解析と考察を行う。対象とするプロトコルは、各車両の位置情報、目的地情報、移動予定経路情報などの利用の有無によって 6 段階にレベル分けする。単純な格子状の道路地図を用意し、その上でメッセージ伝達を行ったときの、メッセージ伝達率を解析する。最後に、移動予定経路情報を利用してメッセージを中継するプロトコルの設計について議論する。

2. VANET による情報流通

2.1 想定する VANET の環境

文献 4) において、VANET のみを用いた情報流通では、2km 四方程度の領域を対象とすることが以下の理由などから妥当であると述べた。VANET におけるメッセージの伝達は、(1) マルチホップ無線通信を用いて車両間でメッセージを中継する (2) ある程度のメッセージ伝達遅延が許容される (DTN: 遅延耐性ネットワーク) ときはマルチホップ無線通信と併用して、ノードとなる車両の高い移動性を利用してデータを持つ車両が運搬する Carry and Forward を用いる、といった方法で実現される。このとき、一般に通信帯域幅には上限があるため、領域が広くなり領域内の車両台数が大きくなると車両一台あたりの通信量が小さくなり、メッセージ到達率は著しく小さくなる。

VANET において交通情報を収集・配信する場合、データの収集に即応性は求められない DTN となるが、交通情報などで許容される遅延は高々 10 分である。市街地での平均車速は 5m/s (約 20km/h) 程度であることを考えると、メッセージの伝達に全て Carry and Forward を用いた場合では高々 3km しか運搬できない。

本稿では一辺 2km 四方の領域を対象領域とし、その中心にインターネットと接続された

路側ユニット (RSU: roadside unit) が存在するとする。各 VANET がカバーする領域外のノードへの通信や、領域間をまたがる車両ノード間の通信は路側ユニット (RSU: roadside unit) を介して行う。

2.2 関連研究: VANET におけるメッセージルーティングプロトコル

1 章で述べたように、車両をノードとする VANET では移動速度が速く頻繁にネットワークの分断が起こるため、歩行者などがノードとなる一般的な MANET で使用される AODV⁵⁾ や DSR⁶⁾ といった汎用のルーティングプロトコルは VANET ではうまく動作しない。

本稿で想定する領域でのデータ伝播では、車両密度が不均衡であり、目的地へのエンドツーエンドのパスが存在しないことが考えられる。このような環境に対し、中継先ノードがない場合には、そのデータをストレージに保存し、中継先ノードが現れた時にデータを送信することで、配送先までデータの運搬を行う Carry and Forward⁷⁾ と呼ばれる手法が提案されている。Carry and Forward を用いた最も簡素なルーティングプロトコルとして、Vahdat らによって Epidemic Routing が提案されている⁷⁾。

Epidemic Routing は、フラッディングをベースにしたルーティングプロトコルであり、全てのノードは感染ノードと非感染ノードに分類される。感染ノードが非感染ノードの通信範囲内に入った時、感染ノードは非感染ノードに対して、ある確率でメッセージを複製する。移動中に会う全てのノードに対してこの動作を繰り返すことで、単純なフラッディングに比べて少ないメッセージ量で輻輳を起こさずに情報を届けることができる。この手法は、ノードの密度や移動性に応じた適切な感染率を決定することが困難であることが知られている。

一方、地理情報を利用してルーティングを行う手法に、Geocast⁸⁾ がある。Geocast では、宛先としてノードではなく地理的な位置を指定し、その周辺領域に存在するすべてのノードにパケットを転送することを目指す。宛先への直線距離に応じたルーティングをするため、Geocast はノード密度が十分高いや、宛先への直線上の経路が存在する場合には有効な手法であるが、宛先地点までの直線上の領域に存在するノード密度が低い場合などには、宛先へ至るパスがあるにも関わらず、宛先にパケットを送信できない場合が発生する。

3. 移動予定経路情報を利用した VANET のメッセージルーティングプロトコルの基礎解析

本節では、情報流通のためのメッセージルーティングプロトコルを、各車両が持つと想定する付加情報の有無によって 6 段階に分け、それぞれの特徴の考察と、宛先までのメッセー

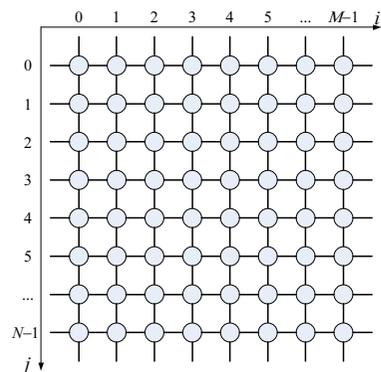


図 1 本解析で用いる格子状の道路地図
Fig. 1 A grid road map for the analysis in this paper

ジ到達率についての基礎解析を行う。

3.1 想定する VANET 環境

本解析にあたって、対象とする VANET を以下のように想定する。

本解析で想定する 1 つの VANET がカバーする領域は数 km 四方の正方領域とし、各車両は無線通信装置を搭載し、近隣の車両とアドホック通信によってメッセージの交換を行う。領域をまたがる 2 地点間の通信は領域中心部にある固定インフラで相互接続された路側装置を用いて行うものとし、本解析では領域内の任意の 2 地点間のメッセージ伝達のみを想定する。各車両は GPS 受信機および車載計算機を搭載し、自車の現在の位置情報や、今後の移動予定経路を検索・案内するカーナビゲーション機能などを利用できるものとする。

道路地図は格子状に交差点と道路がつながったものとし、交差点を頂点、道路を辺としたグラフで表現する（図 1）。各交差点間は等距離であり、旅行時間も同じものとする。各道路の容量や流入数による渋滞などは考慮しない。また、信号についても考慮しない。各車両は、車両発生時にその始点（車両発生交差点）と終点（車両の目的地）間の最短経路の 1 つを移動予定経路として選択し、以後その経路に沿って走行する。なお、等距離の経路が複数ある場合は等確率でその中から選択する。各車両の目的地については、全車両の目的地が VANET の領域内の任意の地点の場合と、全車両の目的地が領域外の十分離れた地点である場合の 2 通りを考える。

対象とする VANET は DTN であり、メッセージにはある程度の遅延を許容する。メッセー

ジは任意の交差点で発生し、メッセージの宛先も任意の交差点が指定されるものとする。メッセージ伝達許容時間は、そのメッセージの発生地点か宛先地点までの最短距離を車両が運搬しても間に合う時間とする。車車間無線通信を用いたメッセージの交換は、同時に同じ交差点内にいる車両間で行われるものとし、このときメッセージの衝突や帯域の輻輳は考慮しない。つまり、ここでは任意の 2 車両についてメッセージ交換が可能であったかどうかの真偽を評価の対象とする。車両によるメッセージ伝達は Carry and Forward 方式を用いる。

3.2 評価するメッセージルーティングプロトコルのレベル分け

VANET において各車両の位置情報等を用いてメッセージルーティングを行うプロトコルについて、以下の 6 段階に分けて特徴を考察する。

3.2.1 単純なフラッディング

最も簡単な方法は、各車両がメッセージを単純にフラッディングする方法である。交差点内の各車両は、近隣車両にメッセージをフラッディングし、それらの車両の移動に任せてデータの拡散を行う。この場合、各車両はあらゆる位置情報、地図情報、移動予定経路情報などを使わない。

この手法の利点は、無線通信装置のみで実現でき、GPS やカーナビなどの位置情報に関する情報が一切不要なことである。欠点としては、無駄なメッセージの流布が多いため、通信トラヒックが爆発し、通信の輻輳を起こすことである。

3.2.2 位置情報を利用したフラッディング

この手法では、各車両は GPS 等により自車位置を把握できると仮定する。メッセージには送信者の現在の位置情報とメッセージの宛先の位置情報が付加され、メッセージ受信者が送信者より宛先に近い場合にそのメッセージを受信し、次の交差点で再配布して中継する。なお、受信者が受信時に送信者より宛先から遠い位置にいる場合は、受信メッセージを破棄する。

ただ、VANET では通信ノードとなる車両の移動速度が大きいため、単純に現在の各車両の位置とメッセージの宛先の位置を用いたルーティングでは次のような問題が起こる。ある車両が持つメッセージの宛先は、その車両の進行方向の先にあるとする。その車両が近隣ノードにメッセージを送信したとき、それを受信した近隣車両は対向車であり、まだすれ違う前だとする。そのとき、対向車はメッセージの宛先に地理的に近い位置にいるため、そのメッセージを中継するノードとなるが、進行方向が逆であるため、実際はメッセージの宛先より遠ざかることになる。そのため、VANET では、メッセージの宛先を進行方向とする近隣ノードはメッセージを受信し、次の交差点で再配布して中継することとする。

この手法は、単純フラディングと比較して、メッセージの伝達に関する通信トラフィックを半分に削減することが可能となる。

3.2.3 目的地情報を利用したフラディング

この手法では、各車両は自車位置および自車の目的地の情報を持つとする。

メッセージには送信者の現在位置とメッセージの宛先の位置情報が付加され、メッセージ受信者の目的地が送信者の現在位置より宛先に近い場合にそのメッセージを受信し、次の交差点で再配布して中継する。なお、受信者の目的地が現在位置よりメッセージの宛先から遠い場合は、受信メッセージを破棄する。

この手法は、単純フラディングと比較して、メッセージの伝達に関する通信トラフィックを4分の1に削減することが可能となる。

3.2.4 目的地情報を利用したユニキャスト

この手法では、各車両は自車位置および自車の目的地の情報を持つとする。各車両は、メッセージを交換する前に、近隣車両間でそれぞれの目的地の情報を交換する。

メッセージの送信車両は、受信した近隣車両の目的地情報から、現在位置からその各車両の目的地までの直線経路を計算し、最もメッセージの宛先に近づく近隣車両にメッセージを中継する。このとき自車の目的地までの直線経路が最もメッセージの宛先に近づく場合はメッセージは中継しない。

この手法では、近隣車両間で目的地情報を交換するための制御トラフィックが発生するが、メッセージの伝達に要するトラフィックを大きく削減できる。ただし、中継時のメッセージのコピー数が少なくなるため、受信した車両が目的地に着くまでにメッセージを宛先まで直接伝達できなかつたり、新たな中継車両を途中で見つけられなかった場合にメッセージが消失する可能性が高くなる。

目的地情報利用フラディングや同ユニキャストでは、道路地図に大きな空白地帯（void）があり、その地帯を迂回してメッセージを伝達する必要がある場合はメッセージが消失する。

3.2.5 近傍車両の予定経路情報を利用したユニキャスト

この手法では、各車両は自車位置、自車の目的地、および、自車がこれから移動する予定経路情報を持つとする。各車両は、メッセージを交換する前に、近隣車両間でそれぞれの予定経路情報を交換する。

メッセージの送信車両は、受信した近隣車両の予定経路情報から、メッセージの宛先と各車両の予定経路までの最短距離を計算し、最もメッセージの宛先に近づく近隣車両にメッセージを中継する。このとき自車の予定経路が最もメッセージの宛先に近づく場合はメッ

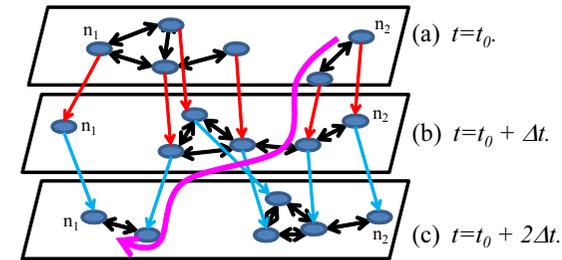


図2 時間軸を追加したノード接続性グラフ

セージは中継しない。

この手法では、目的地利用ユニキャストにおける void の問題を解決できる。また、各車両が予定経路上の交差点をいつ通過するかといった旅行時間情報がある場合、許容遅延時間を満たせない可能性が高いメッセージを先に破棄して、メッセージ伝達に関する通信トラフィックをさらに削減することもできる。

3.2.6 領域内全車両の予定経路情報を利用したユニキャスト

この手法では、各車両は自車位置、自車の目的地、および、自車がこれから移動する予定経路情報を持つとする。各車両は、メッセージを交換する前に、領域内の車両間でそれぞれの予定経路情報を交換する。各車両はあらかじめ交換してある領域内の全車両の予定経路情報から文献4)で提案した時間軸を追加したノード接続性グラフを構築する。今、図2において n_2 から n_1 へメッセージを伝達したいとする。VANETをネットワークの分断（ノードの接続性の分断）が頻繁に起きるDTNと捉えると、図2(a)~(c)各時点において n_1 と n_2 は非連結であるが、時間軸を追加したノード接続性グラフでは経路があることが判断できる。提案しているノード接続性グラフは、各車両の予定経路情報を用いて、特定の時間間隔での各車両の位置を推定し、通信機会がある車両間に接続性があるとして辺を引いたグラフである。ここで、このノード接続性グラフでは時間軸に沿った辺が有向辺であることに注意されたい。

この手法では、メッセージの送信車両は、そのノード接続性グラフからそのメッセージまでのルーティング経路のノード間接続性を計算し、経路がある場合は、次ホップの車両となる近隣車両に中継する。このとき、経路が発見できない場合はメッセージは到達しないため、中継せずその時点で破棄する。

この手法により、冗長なメッセージルーティングに関する通信トラフィックを最大限に削減

できる。ただし、領域内の全車両の予定経路情報を周知するための制御トラフィックが大きくなること、遅延が大きいことが大きな問題となる。また、不十分な情報によってノード接続性グラフを作成した場合、実際には伝達可能であるメッセージをメッセージソースで破棄する可能性もある。また、ノード接続性グラフは移動予定経路上の交差点の通過予定時刻を利用して構築される。分散の少ない移動予定経路と異なり、実際の通過予定時刻は交通状態によって大きく変動する。それにより、ノード接続性グラフの精度が低下する。

3.3 各プロトコルのメッセージ伝達率の基礎解析

3.3.1 交通流について

本解析において、各車両は図1に示す格子状の道路地図上の任意の2点を出発地・目的地とし、最短経路で走行する。隣り合う各交差点間の旅行時間は等しいと仮定するため、東西方向に m 、南北方向に n 離れた2点間の経路は $\frac{(m+n)!}{m!n!}$ 通り存在する。なお、各交差点では同じ距離の経路は等確率で選択する。ここである地点(例えば図1で $(i, j) = (0, 0)$)にいる車両が、その目的地 $((i, j) = (M, N))$ までの東西方向に i 、南北方向に j 離れた $(0 \leq i \leq M, 0 \leq j \leq N)$ 交差点を通過する確率 $P(i, j)$ は二項係数を用いて次のように表される。

$$P(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{2^{(i+j)}} \binom{i+j}{i} & (0 \leq i < M, 0 \leq j < N) \\ \frac{1}{2^{(i+j)}} \sum_{x=0}^j \binom{i+j}{x} & (i = M, 0 \leq j < N) \\ \frac{1}{2^{(i+j)}} \sum_{x=j}^{i+j} \binom{i+j}{x} & (0 \leq i < M, j = N) \\ \frac{1}{2^{(i+j)}} \sum_{x=0}^{i+j} \binom{i+j}{x} & (i = M, j = N). \end{cases} \quad (1)$$

なお、各車両の目的地は十分遠く、 $(-\infty, -\infty), (-\infty, \infty), (\infty, -\infty), (\infty, \infty)$ のいずれかで代用できるとした場合(それぞれ北西、南西、北東、南東を表す)、任意の交差点を通る確率は $P(i, j)$ の第1式のみを用いて表すことができる。

3.3.2 フラッディングベースプロトコルのメッセージ伝達率

ここでは、まず各フラッディングベースのプロトコルについて、メッセージを受信した車両が、メッセージの宛先に直接到達する確率を求め、それを踏まえてメッセージの伝達率を求める。

ある車両が交差点にてメッセージを近隣車両に送信した場合、それを受信した車両が今後 (m, n) 離れたそのメッセージの宛先を通過する確率 $P_1(m, n)$ は以下のよう表される。

$$P_1(m, n) = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2^{(m+n)}} \binom{m+n}{m}. \quad (2)$$

ここで、右辺の最初の項である $\frac{1}{4}$ は、その車両がメッセージの宛先に進む確率を表している。なぜなら、各交差点にいる車両の目的地方向は北西、南西、北東、南東のいずれか4通りであるからである。

次に、位置情報利用したフラッディングでは、受信車両の位置が送信車両の位置よりもメッセージの宛先から遠くなる場合(進行方向と逆)にメッセージを破棄し、近い場合(進行方向)にはそのメッセージのコピーを Carry and Forward によって次の交差点まで運ぶ。このため、遠ざかる場合は受信したメッセージは破棄し、コピーを作らない。ここでメッセージを受信した車両が今後 (m, n) 離れたそのメッセージの宛先を通過する確率 $P_2(m, n)$ は以下のように表される。

$$P_2(m, n) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^{(m+n)}} \binom{m+n}{m}.$$

ここで、右辺の最初の項である $\frac{1}{2}$ は、その車両がメッセージの宛先方向に進む確率を表している。式(2)と比較して、範囲が半分絞られてるため、確率が2倍になっている。

最後に、各車両の目的地情報を利用したフラッディングの場合、各車両はメッセージの受信時に現在地とその車両の目的地とメッセージの宛先を比較し、その車両の目的地が現在地よりメッセージの宛先に近づく場合にそのメッセージを中継する。ここでメッセージを受信した車両が今後 (m, n) 離れたそのメッセージの宛先を通過する確率 $P_3(m, n)$ は以下のように表される。

$$P_3(m, n) = \frac{1}{2^{(m+n)}} \binom{m+n}{m}.$$

この式は式(1)の第1式と同様になる。 $P_3(m, n)$ のグラフを図3に示す。図より $m \approx n$ であるような交差点 (m, n) を通過する車両が多いことがわかる。これは、各車両の目的地が南東の十分遠い交差点 (∞, ∞) であるためである。この結果より、大域的な交通流の流れに沿った方向へのメッセージ伝達は、交通量が多いために効率よく行えるということが確認できた。

次に、各車両の目的地情報を利用したフラッディングの場合についてメッセージ伝達率を導出する。まず、ある車両において、その車両がフラッディングしたメッセージを受信した車両がメッセージ宛先に直接到達する確率を求める。これは、Carry and Forward ルーティングのラストワンマイルが到達するかどうかの確率である。その後、その確率を用いてメッセージ伝達率を導出する。

ある車両は交差点 $(0, 0)$ にて宛先 (m, n) のメッセージを受信したとする。その車両は今後交差点 (m, l) および $(m+1, l)$ $(0 \leq l < n)$ 、または、交差点 (l, n) $(0 \leq l < m)$ および $(l, n+1)$ を通過すると仮定する。このとき、 (h, l) および $(h+1, l)$ $(h = m)$ を通過する確率、または、

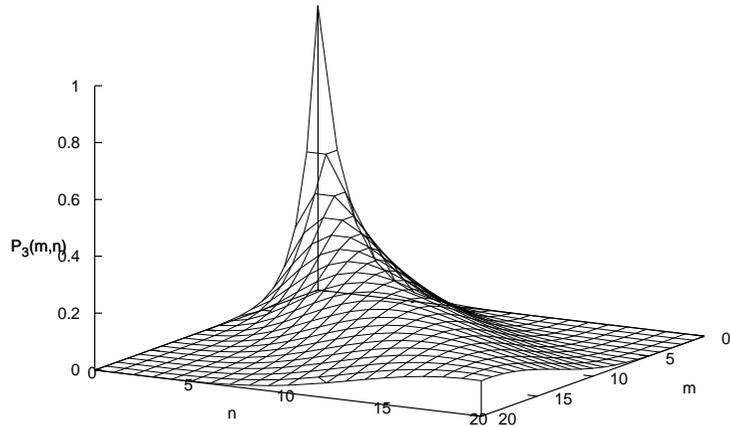


図3 交差点(0,0)でメッセージを受信した車両がメッセージの宛先方向の距離(m,n)の交差点を通過する確率 $P_3(m,n)$

(l,h) および (l,h+1) (h=n) を通過する確率 $P_{th}(h,l)$ は次式で与えられる.

$$P_{th}(h,l) = \frac{1}{2} P_3(h,l) = \frac{1}{2} P_3(l,h).$$

その車両は交差点(m,l)を通過するものとする. この車両が(0,0)から(m,l)まで $m+l+1$ 個の交差点を $(0,0) - (i_1, j_1) - (i_2, j_2) - \dots - (i_{m+l-1}, j_{m+l-1}) - (m,l)$ と移動してメッセージをブロードキャストして伝達したとき, それを受信した近隣車両の中で(m,n)を直接通過する車両が少なくとも1台以上存在する確率 $PD_3(m,n,l)$ は以下で表される.

$$PD_3(m,n,l) = 1 - \prod_{x=0}^{m+l} (1 - P_3(m-i_x, n-j_x)).$$

この宛先までのメッセージ伝達率を評価するため, 図4のようなメッセージの宛先までの距離が(M,N)の場合を考えた. 車両は(0,0)の交差点を出発し, メッセージを途中の交差点でブロードキャストしながら, 図の右端の(M,l) ($0 \leq l < N$), または, 下端の(l',N) ($0 \leq l' < M$) のいずれかのノードを経由して, その車両の目的地へ進む. ここで簡単化のため, 車両が図の右端のノードを経由する場合は, 車両は出発点から $(0,0) - (1,0) - (1,1) - (2,1) - (2,2) - \dots - (l,l) - (l+1,l) - (l+2,l) - \dots - (M,l)$ のように進むとする. また, 車両が図の下端のノードを経由する場合は, 車両は出発点から $(0,0) - (1,0) - (1,1) - (2,1) - (2,2) - \dots - (l',l') - (l',l'+1) - (l',l'+2) - \dots - (l',N)$ のように

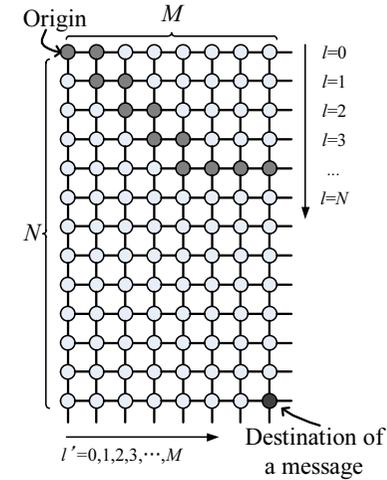


図4 目的地情報を利用したフラッディングにおける, 最終ホップのメッセージ伝達率評価用トポロジ

進むとする. 図中の最も左上の交差点はある車両がメッセージを受信した点, 最も右下の交差点はそのメッセージの宛先である. また, 図中の灰色の交差点はその車両が移動する経路であり, ここでは $l=4$ を想定している.

$M=20, N=30$ としたとき, 図4の最右列のノード(M,l) についての $PD_3(M,l)$ を図5に, 同様に図4の最下行のノード(l',N) についての $PD_3(l',N)$ を図6に示す. 図3の結果より, ある交差点(m,n)にあるメッセージは $(m+i, n+i)$ ($0 < i$) に高い確率で到達する. 逆に言えば, 宛先(m,n)のメッセージは, 早いうちから $(m-j, n-j)$ ($j > 0$) であるような交差点に到達すれば, (m,n)にも到達しやすくなる. 図5の結果より, 最右列を通過する場合, 送信車両の経路が $(m-j, n-j)$ ($j > 0$) の交差点を横切らないため, 到達率は低い. 対して, 図6の結果より, 最下行を通過する場合, 送信車両の経路が $(m-j, n-j)$ ($j > 0$) の交差点を横切るため, 到達率が高くなっている. また, $M < N$ であることも, この図の結果の到達率が高い原因である. なお, 今回評価した $M \times N$ のトポロジにおいて, ある車両がメッセージの宛先までの最終中継車両の1つ前であるとした場合, メッセージ到達率 $D_1(M,N)$ は以下の式で表される.

$$D_1(M,N) = \sum_{l=0}^{N-1} \frac{1}{2} \cdot P(M,l) \cdot PD_3(M,N,l).$$

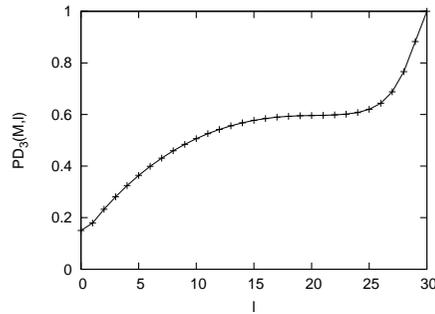


図5 最右列の交差点 (M, l) に車両が到達したとき、それまでにその車両から直接メッセージを受信した車両の少なくとも1台がメッセージの宛先 (M, N) の交差点を通過する確率 $PD_3(M, l)$

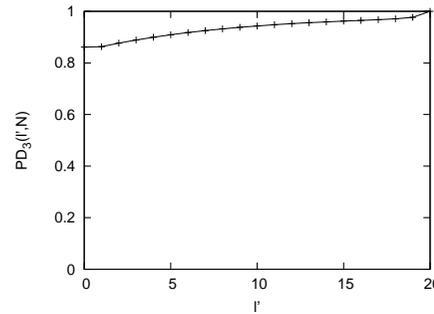


図6 最下行の交差点 (l', N) に車両が到達したとき、それまでにその車両から直接メッセージを受信した車両の少なくとも1台がメッセージの宛先 (M, N) の交差点を通過する確率 $PD_3(l', N)$

なお、今回評価した上記のトポロジでは以下の値を得た。

$$D_1(20, 30) = 0.357167. \quad (3)$$

この結果より、フラッディングベースでは、通信帯域の制限を考慮しなかったとしても、1回の中継でメッセージの宛先までルーティングできる確率は $(M, N) = (20, 30)$ のときで3分の1強であると分かった。

ここまでのフラッディングベースのプロトコルは、送信車両は中継した先の車両がメッセージの宛先を通過するかどうか判断できない。そのため送信車両は引き続きフラッディングを行う。到達率が3分の1である場合、今までの3倍のメッセージをコピーしてばらまくことで、メッセージの到達数を1以上にすることができる。ただし、どの近隣車両がメッセージの宛先交差点を直接通過するかは分からないため、実際のネットワークにおける帯域の制限で限られたメッセージ数しか交換できない場合は、著しく伝達率を下げることになる。

3.3.3 移動予定経路情報を利用したプロトコルのメッセージ伝達率

先述したフラッディングベースのプロトコルの考察では、通信帯域の制限について考慮しなかった。通信帯域の制限がない場合、フラッディングは最も高いメッセージ伝達率を示す。しかし、実際は多量のフラッディングトラヒックが発生し、各車両においては保持する全てのメッセージを一度に近隣車両にブロードキャストできなくなるため、冗長なメッセージ交換を極力削減することや、メッセージに優先順位をつけることが必要とされる。移動予定

経路情報のメッセージルーティングへの利用は、冗長なメッセージ交換を極力削減したり、メッセージに優先順位をつけるための有効な手段である。

フラッディングベースの場合、メッセージの宛先までの伝達率が1/3とされているとき、近隣車両が3台以上存在しそれら全にメッセージを中継すれば、宛先までのメッセージ伝達数の期待値は1を超える。しかし、あくまでも連続値としての期待値であるため、近隣車両が今後途中でメッセージを破棄したり、メッセージの宛先に近づかなかつたり、より優先度の高いメッセージを受信してしまったりすることで、メッセージ伝達数が0になる可能性もある。反面、近隣車両数が1台であっても、その1台がメッセージの宛先を直接通過する可能性もある。問題は、送信車両がそれらを判断できないため、フラッディングの手続きは同じ調子で引き続き行われることである。

移動予定経路情報を用いたプロトコルの場合、同様に伝達率1/3のときに近隣車両数が3台以上いた場合、それらの近隣車両から得られる移動予定経路情報を用いることで、メッセージの中継が必要かリアルタイムに把握できる。そのため必要に応じたメッセージのルーティングができる。また、確率的に近隣車両にメッセージを受信させるのではなく、近隣車両の予定経路情報から最もメッセージの宛先に近づく、車両に中継する、最も確率の高いものに中継するといった選別が可能であり、帯域制限をしないフラッディングと同等のメッセージ伝達率を、極力少ないオーバーヘッドで実現することが可能である。

ここでもフラッディングプロトコルの性能解析と同じように、簡単な道路トポロジを用いてメッセージ伝達率を解析する。なお、ここでメッセージの宛先はある1つのVANETがカバーする数km四方の領域内の任意の交差点とする。評価用のトポロジを図7に示す。あるVANETがカバーする領域を $M \times N$ の交差点領域とする。送信車両の起点交差点からメッセージの宛先までの距離は (m, n) ($0 \leq m \leq M, 0 \leq n \leq N$)、その送信車両の移動予定経路はメッセージの宛先と最も近づくところで距離 l である。このとき、点線の菱形で表される、メッセージの宛先により近い交差点を移動予定経路に含む近隣車両がいる場合は、その車両にメッセージを中継する。

メッセージ送信車両の交差点を $(0, 0)$ とし、この交差点にいる車両で南東方向に向かう車両の目的地は (∞, ∞) であるとする。このとき、メッセージの宛先である交差点 (m, n) から半径 l 以内を通る確率は、図7の交差点 a から z に注目して、以下に挙げられる組み合わせとなる： c を通過、 f を通過、 p を通過、 p を通らず s から東へ、 p と t を通らず w から東へ、 c を通らず d から南へ、 c と g を通らず h から南へ。以上列挙したものはそれぞれ独立な事象である。

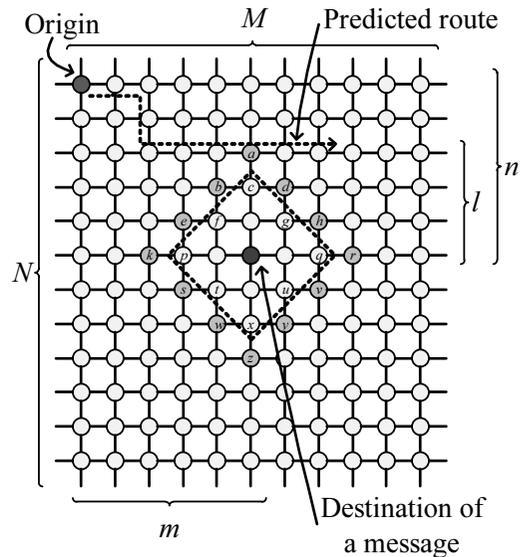


図7 予定経路情報を利用したメッセージ伝達率評価用トポロジ

まず，“ p を通らず s を通る”確率 $P(s \cap \bar{p})$ を導出する．ベイズの定理および条件付き確率の定理から次式が導かれる．

$$P(s \cap \bar{p}) = P(s|\bar{p})P(\bar{p}) = P(s) - P(s \cap p) = P(s) - P(s|p)P(p).$$

ここで $P(s|p) = 1/2$ である．また，“ p を通らず s を東へ”進む確率は $1/2 \cdot P(s \cap \bar{p})$ となる．

同様に，“ p と t を通らず w を通る”確率 $P(w \cap \bar{s} \cap \bar{p})$ は次式で表される．

$$P(w \cap \bar{s} \cap \bar{p}) = P(w \cap \overline{s \cup p}) = P(w) - P((s \cup p) \cap w) = P(w) - P(w \cap p) - P(\bar{p} \cap s)P(w|s).$$

なお，“ p と t を通らず w から東へ”いく確率は $1/2 \cdot P(w \cap \bar{s} \cap \bar{p})$ となる．残りの確率も同様に求められる．

最終的に，交差点 $(0,0)$ における近隣車両が，自車とメッセージの宛先交差点 (m,n) の最短距離 l より近い経路を今後移動する確率は，先述した独立な事象が起こる確率の和となる．

中継する近隣車両が見つかる度に l が減少していき， $l = 0$ になったときにメッセージの宛先に到達する車両が受信したことになる．そのため，中継のためにメッセージをブロードキャストする交差点は高々 l 個であり，フラッディングベースのプロトコルにおいて毎交

差点でメッセージをブロードキャストすることと比べると，冗長性がきわめて低い．また，そのようなトラフィックの少なさにも関わらず，メッセージ到達率は通信帯域を考慮しないフラッディングベースのプロトコルと同等の性能を実現可能である．

4. まとめ

本稿では，数 km 四方程度の領域をカバーする VANET において，領域内の任意の地点間のメッセージを Carry and Forward で宛先まで伝達する複数のルーティングプロトコルの基礎性能解析と考察を行った．まず，VANET におけるメッセージルーティングプロトコルを，位置情報，移動予定経路情報の利用の有無に応じて 6 段階にレベル分けし，それぞれの特徴について述べた．メッセージ伝達率について，格子状の地図と単純な確率モデルを用いて性能解析を行った．

より詳細なメッセージ伝達率の性能解析，および，より現実の近い道路地図のトポロジと交差点間の旅行時間の情報を用いた計算機シミュレーションによる性能解析を行うことを今後の課題とする．

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：ITS ホームページ. www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html.
- 2) (財)道路交通情報通信システムセンター：VICS. www.vics.or.jp.
- 3) 本田技研工業(株)：インターナビ・プレミアムクラブ. www.premium-club.jp.
- 4) 木谷友哉：移動予定経路情報を利用可能な VANET における時間軸を追加した接続性グラフの構築 (2010).
- 5) Perkins, C. and Royer, E.: Ad hoc on-demand distance vector routing (1999).
- 6) Johnson, D. and Maltz, D.: Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks (1996).
- 7) Vahdat, A. and Becker, D.: Message Ferrying: Proactive Routing in Highly-partitioned Wireless Ad Hoc Networks (2003).
- 8) Ko, Y. and Vaidya, N.: Geocasting in mobile ad hoc networks: location-based multicast algorithms (1999).