

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ベクトルルーティング

阪口紘生^{†1,a)}

吉廣卓哉^{†2,b)}

柴田直樹^{†1,c)}

伊藤実^{†1,d)}

近年、車同士が自律的にネットワークを構築して相互に情報交換をする VANET の研究が盛んに行われている。VANET では位置情報を利用して宛先位置までパケットを届けるジオメトリックルーティングが主流であるが、ジオメトリックルーティングでは宛先までの通信路を確保するために一定以上の車両密度が必要であり、都市部にのみ適用が可能である。車両密度が低い郊外を対象とする場合には、他の車両が通信範囲に入ったときにパケットを転送する Delay Tolerant な経路制御も提案されているが、宛先までの高いパケット到達率を保証することができないため、実用には不十分である。我々は先行研究において、路側に、広域ネットワークに接続しない低コストな無線基地局を設置し、基地局間をマルチホップ通信することにより任意の宛先地点まで高信頼なパケット配送を行う新たなネットワークの形態を提案し、そのうえで動作するルーティング手法を提案した。具体的には、無線基地局をルータ、車両をパケットのキャリアと見なし、距離ベクトル型ルーティング法を拡張して適用することで、都市部と郊外の両方においてシームレスに適用でき、基地局間の高信頼なマルチホップ通信を実現するルーティング手法を提案した。しかし、この手法では、道路の交通量を考慮せずに経路を選択するため、交通量の少ない道路を用いてパケットを配送する 경우가少なからず発生し、スループットや遅延性能が低下する問題があった。本研究では、交通量に応じて道路のメトリックを計算し、これを考慮して転送経路を選択することにより、より交通量の多い道路を用いてパケットを転送し、宛先までのスループットと遅延性能を向上するルーティング手法を提案する。また、期待する宛先までのパケット到達確率をパラメータとして設定できるようにすることで、信頼性を向上する仕組みを導入する。

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ことが問題である。

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。

このうち、本研究で扱うユニキャストルーティングにおいては、GPS などから位置情報を取得し宛先の方にパケットを転送するジオメトリックルーティングが主流である[5][6]。しかし、これらは車両密度が高い都市部を対象とし

ており、道路内の車両密度が低い郊外では VANET 上で宛先までの経路を確保できない問題がある。郊外においては、通信可能範囲に車両が存在しない場合でも、Carry and Forward により他の車両と出会ったときに通信し、パケットの損失を防ぐ手法が提案されている[7]。この方法は、遅延が大幅に増加する代わりに宛先までの到達確率を向上できるが、それでも依然として、車両密度が低い郊外では宛先まで高確率にパケットを転送することは難しい。

そこで筆者らは、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し、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[8]。この手法では、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、最終的には宛先基地局に配送される。この手法は、バックボーンに接続されない比較的安価な無線基地局を用いることで、都市部か郊外かにかかわらずシームレスに適用でき、かつ高い確率でパケットを配送する高信頼なネットワークを実現する。広域にわたる道路交通網そのものをシームレスかつ高信頼なパケット配送ネットワークとして活用することで、道路網上で様々なサービスを提供する基盤になることが期待される。

しかし、文献[8]では、道路ごとの交通量を考慮しておらず、交通量が少ない道路を経路として選択した場合には、スループットや遅延性能が劣化する問題がある。本論文では、交通量をもとに道路のメトリック値を計算し、メトリック値を考慮して交通量の多い道路を優先的に選択することで、ネットワークのスループットと遅延性能を向上するルーティング手法を提案する。また、期待する宛先までの

^{†1} 奈良先端科学技術大学院大学
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

a) sakaguchi.hiroki.rs5@is.naist.jp

b) tac@sys.wakayama-u.ac.jp

c) n-sibata@is.naist.jp

d) jito@is.naist.jp

パケット到達確率をパラメータとして設定できるようにすることで、信頼性を向上する仕組みを導入する。

本論文は以下のように構成される。2章ではVANETにおけるルーティング手法の現状と関連研究について述べる。3章では著者らが提案したネットワークの枠組みを説明したうえで、提案手法を述べる。4章ではシミュレーション実験の結果を述べ、5章でまとめる。

2. 関連研究

VANETにおけるユニキャストルーティングでは、車両特有の高いモビリティのため、一般的なアドホックネットワーク向けのルーティング方式は適用が難しい。このため、ジオメトリックルーティングを用いた手法が主に研究されている。その代表例がGPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing)[5]である。GPSRでは、ノードGPSで取得した位置情報から、宛先の位置に最も近いノードにパケットを転送することで、最終的に宛先にパケットを届ける。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できない場合が多く発生する。この問題を解決するため、LochetらはGPSRを車の移動パターンに合わせて拡張し、交差点の中心付近のノードを経由させることで、道路に沿い、遮蔽物を避けた経路選択を行うGPCR(Greedy Perimeter Coordinator Routing)[6]を提案した。しかし、GPCRでは、道路内の車両密度が十分に高くなければ宛先までの経路を確保することができないため、都市部以外では信頼性の高い通信を提供することは難しい。

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には、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パケットの到達確率を向上する手法である。しかし、このように大きな遅延を許すDTN(Delay Tolerant Network)を考えた場合にも、車両のモビリティが大きい場合、宛先に高確率でパケットが到達する信頼性の高い通信は実現できない。

一方、信頼性を高めるために、路側機を用いて車両にデータを送る方式も存在する。しかし、これらは、DSRC[1]やVICS[2]のように路側機と車両が直接通信するものが多い。路側機からのデータを複数ホップの車々間通信で拡散する方式も存在するが、データの発生源である路側機を中心として、周囲の比較的小さい範囲へのデータ送信のみを対象としている。また、広い範囲のデータ配信ができないだけでなく、データ送信の信頼性も保証されない。

一方、本研究では、広域ネットワークに接続しない無線基地局を主要な交差点に設置することで、車両が到達できる広い範囲の宛先に、データを高い到達率で配信できるネットワークを実現している。また、本手法は、都市部と郊

外にかかわらず、シームレスに動作できる特徴を持つ。

3. 道路交通網上の距離ベクトル経路制御

本章では、提案手法を説明する。本論文の提案は文献[8]の拡張であるが、提案手法の意義を十分に理解するためには、全体像の把握が不可欠である。従って、本論文では、文献[8]の内容も含めて提案する枠組み全体を説明する。本研究の提案手法は、メトリックの設計とパケット複製方法の考案である。そこだけには限られないが、それらの内容は主に3.9節、及び3.10節に詳しく述べる。

3.1 前提条件

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。なお、ノードは道路交通網内に一定以上の密度で設置する必要があるが、必ずしも全ての交差点にノードを設置する必要はない。

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、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、例えばノード6に対してノード2, 5, 7, 10が隣接ノードである。また、ノードSからDに至るまでに車両が遭遇するノードの数をホップと定義する。例えば、図1ではノード1から4までは3ホップである。ノードSからDまでである経路で到達する場合に必要な車両の台数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16まで矢印のとおりに到達する場合には、ノード1から16までは2キャリアの距離である。

3.3 ルーティング方式の概要

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いて設計されている。提案手法では、まず各ノードが、1台の車両（つまり1キャリア）で高確率に到達できるノードを発見する。次に、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キャリアのノード、及びそのキャリア数、距離（メトリック）を把握する。各ノードは、宛先ノードまでの距離が最小となる1キャリアノードを中継点として選択し、経路表を構成する。このために、以下の4つのメッセージを用いる。

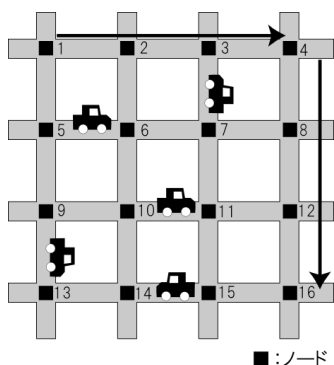


図 1: 想定する路上交通網とノード配置の一例

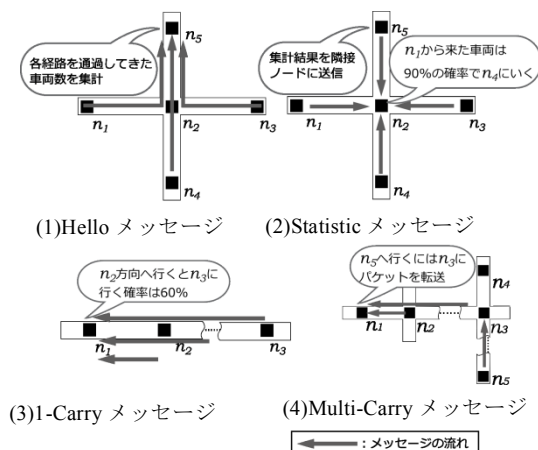


図 2: 各メッセージによって得られる情報

- 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

各メッセージの役割を、図 2 を用いて述べる。Hello メッセージは、あるノードに車両が到達したとき、その車両が通過した 2 ホップ前、及び 1 ホップ前のノードを伝達する。これにより、周囲のどの経路を何台の車両が通過したかが集計される。Statistic メッセージは、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。図 2(2)の n_2 は、全ての隣接ノードからの値を集計することで、ある 1 ホップ前ノードを通過し自身に到達した車両が、別の 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、Statistic メッセージにより把握した確率を広告する。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。Multi-Carry メッセージは、1-Carry メッセージ、或いは Multi-Carry メッセージで知った 1 キャリーノードを図 2(4)のように他のノードに広告する。これにより、図 2(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。パケットが発生すると、車両によって最寄りノードに送信される。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

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

ードを検索する。ノードに車両が到達したとき、その車両の 1 ホップ前ノードがわかる。これを用いて、その中継ノードに到達する確率が高い車両にパケットを送る。このとき、中継ノードまでの到達確率から、一定以上の到達率が確保できる数だけパケットを複製して送る。車両が中継ノードに到達すると、パケットを受信した中継ノードは、同様に、次の中継ノードに向かう車両を選び、パケットを複製、送信する。この繰り返しにより、複数のノード、車両を利用したマルチホップ通信が実現される。

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すると、車両はノードに対して制御メッセージセットを送信する(図 3)。次に、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。交換すべき制御メッセージを 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、送受信のオーバーヘッドを抑えている。制御メッセージセットの交換後に、車両がデータパケットを保持していた場合には、そのノードが中継点あるいは宛先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ならば、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が、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、 $N_{encount}$ は車両がこれまでに遭遇したノードの数であり、 MC_{send} は 1 ノードが車両に送信する Multi-Carry メッセージの数である。 MC_{send} は定数として事前に設定される。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} 個がノードから車両に渡される。車両からノードに新たに渡されるメッセージセットのフォーマットも同じである。1-Carry 及び 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。つまり、車両とノードの間で交換されるメッセージの大きさは常に同じであり、数 kBytes 程度に抑制できる。

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し、自身から2ホップ以内の交通量を測定する。

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、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の交通量を集計できる。2ホップ前までの交通量の集計には、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_1 時間にそれらを通して n_0 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。よって、Hello カウントテーブル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。たとえば、図4の道路交通網とノードの配置において N_1, N_2 の生成した Hello メッセージを N_3 が受信したとき、 N_3 は自身の Hello カウントテーブルの $c(N_1, N_2, N_3)$ の値を1だけ加算する。同様に、 N_5, N_2 の生成した Hello メッセージを受信したとき $c(N_5, N_2, N_3)$ の値を1だけ加算する。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し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

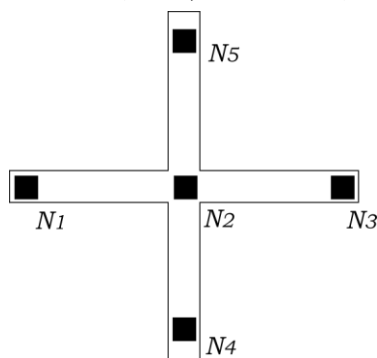


図4: 道路交通網とノード配置の例(1)

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。これによって、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 カウントテーブルを全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 t_1 内に何台あったのかを把握できる。よって、 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 $\sum n_{11} \{c(n_{11}, n_0, n_{any})\}$ 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。たとえば、図4の例において、 N_2 が N_1, N_4, N_5 から Statistic メッセージを受信すると、 N_3 から自身 (N_2) に到達した車両台数と、 N_2 を通過し、それぞれのノードへ向かった車両台数がわかる。よって、 N_3 から N_2 来た車両が、次にそれぞれのノードへ向かう確率が計算可能となる。

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キャリア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。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。

1-Carry メッセージの動作を、図5を用いて説明する。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 $\operatorname{argmax}_{n_3} \{p(n_1, n_2, n_3)\}$ を検索し、その逆向きの移動確率 $p(n_3, n_2, n_1)$ (図5①矢印の確率) を1-Carry メッセージとして車両に送信する。このメッセージを n_3 が受信すると、 n_3 は $p(n_4, n_3, n_2)$ (図5②矢印の確率) を知っているの、これらから、 n_4 から来た車両が n_1 に到達する確率 $p(n_4, n_3, n_1) = p(n_4, n_3, n_2) \times p(n_3, n_2, n_1)$ (図5③矢印の確率) を計算でき、同様に、全ての1キャリア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キャリア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、その宛先を1キャリア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)、距離(メトリック)を管理する。距離の計算については、3.9節で述べる。

最後に1-Carry メッセージの処理を要約する。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

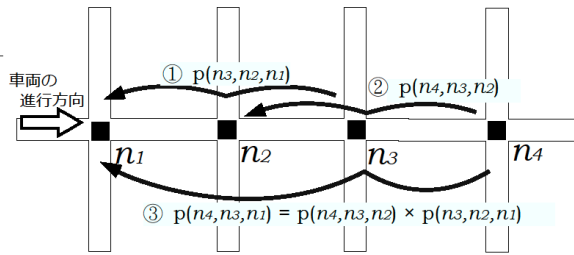


図 5: 道路交通網とノード配置の例(2)

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。

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メッセージである。1 つの Multi-Carry メッセージには 1 つの宛先が含まれており、その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距離を含む。Multi-Carry メッセージが届くことで、それに含まれる中継ノードにパケットを転送すれば、宛先までパケットを到達させられることを知ることができる。

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、通常の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。車両によるパケット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、従来の距離ベクトル型経路制御をそのまま適用すると問題が生じる。図 6 に一般的な距離ベクトル型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 に到達するには、中継ノード n_1 からの距離が 1 であると書かれている。 n_2 は距離を n_1 から n_2 の距離である 1 だけ増加して新たな経路情報を生成し、これを広告する。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。 n_3 は n_2 を中継ノードにしなければパケットを宛先 n_d に届けられないからである。しかし、 n_4 のように n_1 まで 1 キャリーで到達できるノードが受信した場合には、 n_1 にパケットを直接配送の方が効率的であり、 n_2 を中継ノードにすることはとても冗長である。このような中継回数が無駄に増加する問題を解決するために、提案手法では、Multi-Carry メッセージに含まれる経路情報に、「中継ノード」および「前中継ノード」の値を保持させる（図 7）。「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」にはその前の中継点の 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 キャリーで到達可能であれば、 n_1 に直接パケットを送ることが可能となる。

Multi-Carry メッセージをノード n_i が受信したときの処理は、以下の通りである。メッセージに含まれる各経路情報に対して、次の処理を行う。ここで、経路情報を $(n_d, n_i, n_p, dist)$ で表し、 n_d を宛先、 n_i を中継ノード、 n_p を前中継ノード、 $dist$ を宛先までの距離とする。

- (1) 経路表の更新：宛先 n_d までの距離が経路表にある値よりも小さければ、経路表の中継ノードと距離を、 n_i と $dist$ で更新する。ただし、 n_p が 1 キャリーで到達可能であれば、中継ノードは n_p で更新する。
- (2) 経路情報の更新： n_p が 1 キャリーで到達可能でなければ、経路情報を更新する。つまり、 n_i が現在保持する宛先 n_d に対する経路情報を参照し、それが存在しないか、その距離が $dist + metric(n_1, n_i)$ より大きければ、中継ノードを n_i 、距離 $dist + metric(n_1, n_i)$ で更新する。新たに生成された経路情報は、このノードから定期的に広告される Multi-Carry メッセージに含まれる。

ここで、 $metric(n_1, n_i)$ はノード n_1 と n_i の距離を表す。本研究では、交通量の多い道路を優先的に用いたルーティングを行うために、距離として 3.9 節で述べるメトリックを提案し、これを用いる。また、3.10 節で述べるパケットの複製に用いるため、経路情報にはキャリー数（宛先まで何キャリーで到達できるか）を保持する。

Multi-Carry メッセージを受信して経路表を作成する様子を図 8 の道路交通網とノード配置の例を用いて説明する。いま、Multi-Carry メッセージによって、 N_2 が N_4 から、宛先 N_3 に対する経路情報（図 9(a)）を受信したとする。このとき、

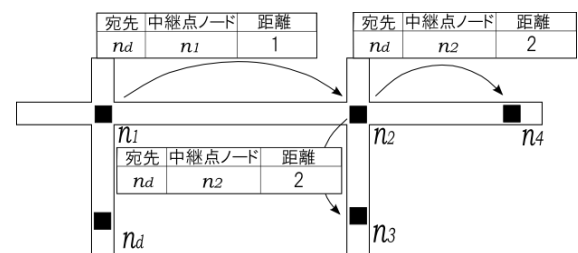


図 6: 一般的な距離ベクトル型ルーティングの場合

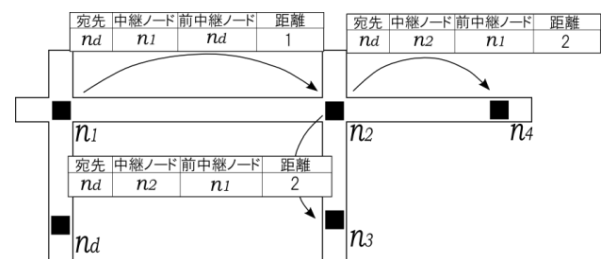


図 7: 提案手法の場合

前述の処理手順に従ってメッセージを処理すると、新たに発行される経路情報は図 9(b)のようになり、ノード N_3 に到達するための中継ノードとして、ノード N_4 が経路表に記載される。次に、 N_2 が、 N_1 を中継ノードとして宛先 N_3 に至る経路情報を受信したとする。このとき、同様に計算された距離（の和）は 0.4 であり、 N_4 を経由した場合よりも小さい。よって、経路表の中の、宛先 N_3 に対する中継ノードは、 N_1 に更新される。さらに、 N_1 が、 N_3 を経由して N_4 に到達する経路が N_2 広告されると、この経路の距離は 0.6 であり、 N_2 から直接 N_4 に向かう経路よりも低いため、 N_2 の経路表に書き込まれる。

3.9 距離（メトリック）の計算

提案手法では、交通量の多い経路を優先的に選択するため、道路に対してメトリックを定義し、このメトリックの下での最短経路を通信経路として用いる。メトリックの設計方針として、インターネットのアナロジーを用いる。つまり、各経路の帯域の逆数をメトリック値（距離）とし、この値の和が最小となる経路を選択する。いま、ノード n_2 から n_3 への帯域を見積もることを考える。このとき、まず、 n_2 に到達した車両が、最も高い確率で n_3 に到達するような前ホップノード n_1 、つまり、 $\operatorname{argmax}_{n_1} \{p(n_1, n_2, n_3)\}$ を見つける。そして、過去 t_1 秒の期間に n_1 から n_2 に到達した車両数 $m_{1 \rightarrow 2}$ と、 n_1 から n_2 に到達した車両が n_3 に到達する確率 $p(n_1, n_2, n_3)$ の積をとることで、一定時間 t_1 秒以内に n_2 から n_3 に到達可能な車両数を計算可能である。提案手法では車両をキャリアとしてパケットを配送するため、この値が帯域に相当する。従って、 n_2 と n_3 の距離 $\operatorname{metric}(n_2, n_3)$ は次式で表現される。

$$\operatorname{metric}(n_2, n_3) = \frac{1}{m_{1 \rightarrow 2} \times p(n_1, n_2, n_3)} \quad (1)$$

3.7 節で述べた通り、このメトリック（距離）は 1-Carry テーブル作成時に計算され、1-Carry テーブルで管理される。また、距離ベクトルの計算のために、Multi-Carry メッセージの処理にも使用され、宛先までの距離を扱う部分全般に適用される。

3.10 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数だけ送信キューを持つ。これは 1 キャリー距離にある中継ノードに対してパケットを送信するとき、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せることで処理を効率化する。

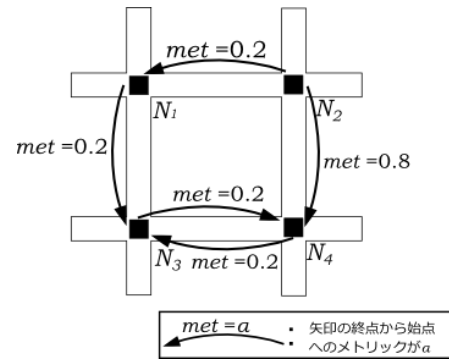


図 8: 道路交通網とノード配置の例(3)

宛先ノード	中継点ノード	前中継ノード	キャリア数	距離
N_3	N_4	N_3	1	0.2

(a) N_4 から N_2 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	距離
N_3	N_2	N_4	2	1.0

(b) N_2 において新たに発行される経路情報

図 9: 受信した経路情報と整形後の経路情報

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。いま、ある時刻に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。

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。なお、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、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 ホップ前通過ノードを特定し、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 11 に示す情報を持っているとする。ある時刻にお

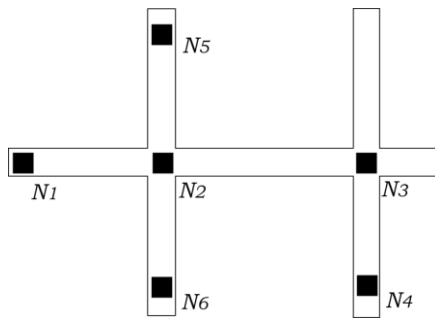


図 10:道路交通網とノード配置の例(3)

Multi-Carryテーブル			1-Carryテーブル			
宛先ノード	中継点ノード	キャリア数	宛先	1ホップ先ノード	到達確率	ホップ数
N_1	N_2	1	N_1	N_1	90%	1
N_3	N_2	1	N_5	N_5	90%	1
N_4	N_2	2	N_6	N_6	90%	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	N_3	N_3	90%	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

Statisticテーブル		
1ホップ前ノード	1ホップ先ノード	到達確率
N_1	N_3	90%
N_5	N_3	5%
N_6	N_3	5%
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

図 11: N_2 のもつ各種情報

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。

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 は自身が中継ノードであるため、次の中継ノードを決定し、中継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。

パケットを高確率で宛先まで転送するために、提案手法ではパケットの複製を行う。あるノード n_1 で宛先を n_d としたパケットが発生し、宛先まで転送するのに必要なキャリア数が c であったとする。このとき、我々が達成したい宛先 n_d までのパケット到達確率を D_{prob} とおく。まず、この水準を満たすために必要な1キャリア毎の到達確率 C_{prob} を求める。 C_{prob} は以下の式(2)を満たす最小の実数である。

$$(C_{prob})^c \geq D_{prob} \quad (2)$$

パケット送信時に、算出した C_{prob} を超えるまでパケットを複製することで宛先までのパケット到達率を一定水準まで向上することができる。また、送信パケットのヘッダ部に

送信元から宛先までのキャリア数 c を記載することで、各中継ノードでも同様に次の中継ノードまでの到達確率 C_{prob} が計算可能となる。たとえば、 n_1 から n_d まで3キャリアであり、宛先までの到達率 $D_{prob}=0.9$ を達成したいのであれば、 $C_{prob}=\sqrt[3]{0.9} \approx 0.965$ となり、各中継ノードは次のノードまでこの確率を超えるようにパケットを複製すれば、宛先までの到達確率 D_{prob} を達成できる。パケットの複製は中継点ごとに行われるため、複製数は指数的に増えてゆくことが懸念される。そこで提案手法では、余分なパケットの複製を抑制するために、一度受信したパケットの複製が一定時間 t_2 以内に受信された場合、パケットを破棄する。つまり、例えば、パケットのハッシュ値を一定時間保持する表を管理する等の方法により、宛先が遠い場合でもパケット複製数の爆発的な増加を避けることができる。

4. シミュレーション評価

4.1 実験環境

提案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。シミュレータは、プログラミング言語 C++を用いて自作した。

4.2 シミュレーションシナリオ

交通量の粗密の混在する道路において、先行手法[8]と提案手法の性能を比較した。評価は図12に示す道路交通網とノード配置により行った。図12の道路のうち、1と4行目、及び1と4列目の4本の道路は交通量が多く、それ以外は交通量が少ない道路である。前者は平均して1.125秒に1台、後者は平均して10秒に1台車両が発生する。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2048kBytes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30とする。ノードは16384kBytes分を保持できるキューを隣接ノードの個数だけ持つ。また、宛先までの到達確率 D_{prob} は90%とする。つまり、各パケットが90%以上の確率で宛先まで到達するようにパケットが複製される。パケットはシミュレーション開始から300秒～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512kBpsから8704kBpsまで512kBps間隔で変動させ、それぞれの総送信レートするとき10回反復試行する。

4.3 本実験における評価指標

本評価の評価指標として、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、 D_{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。

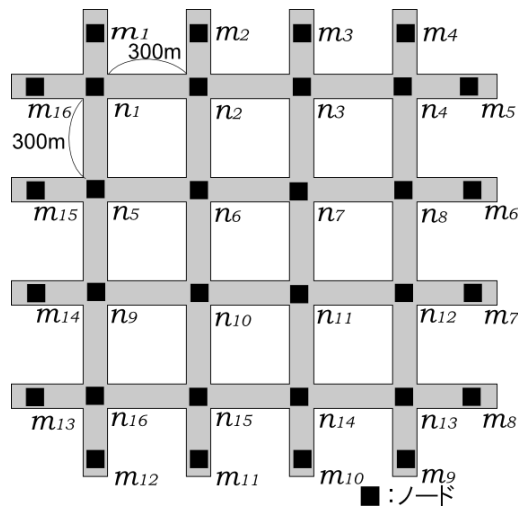


図 12: シミュレーション実験の道路交通網とノード配置

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集計した。

4.4 シミュレーション実験結果

図 13 にパケット到達率を示す。総送信レートが低く 512kbps 程度のときには、先行手法、提案手法ともにパケット到達率は D_{prob} の設定値である 90% を達成できている。しかし、提案手法では 3684kBps を超える総送信レートで到達率が下がり始めるのに対して、先行手法では、かなり低い送信レート 1024kBps で到達率が下がる。これは、先行手法では交通量の低い道路を通るため、ネットワークが早期に飽和し、パケットが損失したためである。

図 14 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、送信レートが低い場合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追従できなくなることがわかる。追従できなくなるときの送信レートは、図 13 のパケット到達率が $D_{prob}(=90\%)$ を下回るときとほぼ一致しており、ネットワークの飽和により送信レートと到達率が下落することが明確にわかる。

図 15 はパケットの到達遅延時間の平均を表す。遅延時間も、ネットワークが飽和するにつれて上昇することがわかる。これは、ネットワークが飽和することにより、各ノードの送信キュー内のパケットが増加したためである。

図 16 にはパケットの複製率を示す。複製率は先行手法では 3.2 倍から 3.3 倍程度、提案手法では、3.5 倍程度で安定していることがわかる。複製率の差が生まれる原因は、先行手法では交通量の低い経路を通れるため通信経路のキャリア数が少ないのに対して、提案手法では交通量の多い経路を選択するため、キャリア数が少し増加するためである。

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先行手法で 1700Bytes、提案手法で 2000Byte 程度であった。この差は、提案手法では Multi-Carry メッセージにメトリックのフィールドが追加されているために発生したものである。このため、制御メッセージサイズが少し大きくなるが、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。

実験結果より、提案手法は交通量の大きい道路を用いてパケットを配送するため、複製数が増加する傾向にあることがわかった。しかし、その増加量は小さく、ネットワークへの負荷は比較的小さいことが明らかになった。一方で、パケット到達率とスループットにおいては、既存手法と提案手法で大きな差異が見られた。ネットワークが飽和する送信レートの差は数倍以上であり、提案手法は先行手法に比べて、許容できる通信量を大きく向上することが明らかになった。また、ネットワークが飽和していない状態では、パケットの到達率は 90% 以上に保たれており、パケット配送の信頼性も確保できることがわかった。

4.6 今後の課題

まず、評価方法の課題を挙げる。現在の評価は自作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仮定をおいている。提案手法の制御メッセージ量は十分に小さいが、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、車両が許容量を超えて密である場合には、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、現実的な電波伝搬モデル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。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。

現在の提案手法では、宛先までの遅延を許したパケット送信のみをサポートしている。しかし、VANET においては、大きな遅延を許さないサービスも数多く考えられている。これをサポートするために、車々間通信により提案手法を補うことが考えられる。例えば、車両が密に存在する都市部においては、パケットを車の進行方向にある車に順に転送することによって、次の中継ノードまでの転送時間を大幅に低減できると考えられる。こうすることで、大きな遅

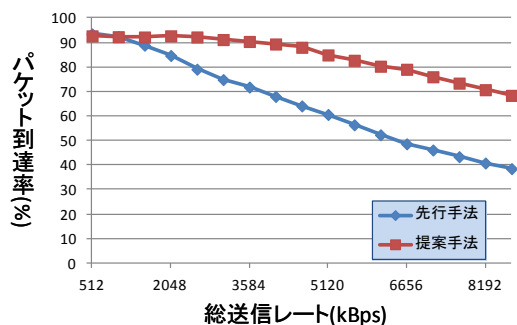


図 13: パケット到達率

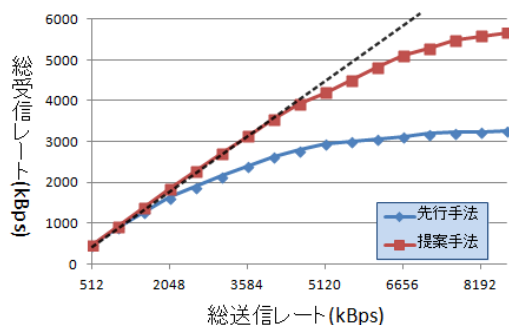


図 14: ネットワーク全体の総受信レート

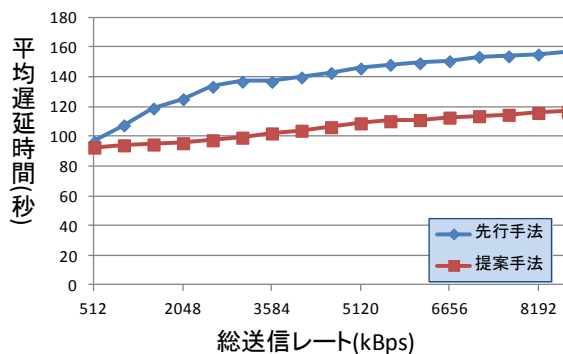


図 15: 平均遅延時間

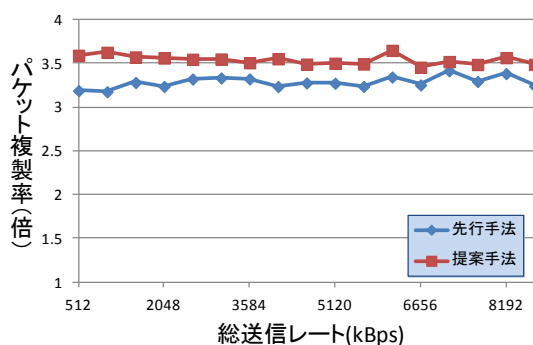


図 16: パケット複製率

延を許容できないアプリケーションをも支える基盤ネットワークも実現できる可能性がある。また、情報を周囲に拡散するようなアプリケーションに対しても、一定範囲にブロードキャストするようなパケット配信パターンを、提案

手法を拡張して実現することが可能であろう。そのように考えると、本手法は将来的に、車々間通信のアプリケーション全体を支えられる通信基盤になる可能性を秘めている。その実現のために、今後も提案手法の拡張を進めたい。

5. おわりに

著者らは文献[8]で、道路交通網を用いた新たなネットワーク形態とルーティング手法を拡張した。本論文では、これを拡張し、交通量の大きい道路を優先利用して通信させるために、道路の交通量からメトリックを計算し、それに基づいてルーティングを行う手法を提案した。また、宛先までの到達率を予め設定しておくことで、ネットワークにおけるパケット到達の信頼性を確保できる方法を提案した。

シミュレーション評価を通じて、提案手法はネットワークが許容できるパケット通信量を大幅に向上させることを確認した。また、それによって、スループット、到達率、及び遅延性能が大幅に向上した。さらに、ネットワークが飽和するまでの送信レートであれば、宛先までの到達率を設定した値に維持できることを示した。

今後の課題は数多いが、まずは現実的な電波伝搬モデルを備えたネットワークシミュレータによる評価を行いたい。そのうえで、提案手法をより現実的な通信基盤とするための拡張を実施したい。

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_dsirc/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).
- 8) 阪口 紘生, 吉廣 卓哉, 柴田直樹, “道路交通網上でパケット配送を実現する距離バクトルルーティング,” 情報処理学会マルチメディア・協調・分散とモバイル DICOMO シンポジウム, pp. 2E-3, (2013).