

路車間通信範囲拡張のためのアドホック網の設計と実装

吉岡 顕[†] 小佐井 潤[†]
 本多 輝彦[†] 植原 啓介^{††}

ITS (Intelligent Transport Systems) の分野では、安全運転支援を中心に様々な通信を用いたアプリケーションが検討されている。そのような中で、MIP や NEMO などを利用したシームレスハンドオーバー技術の利用が検討されている。また一方で、自動車によってパケットを中継するアドホックネットワークにも期待が集まっている。本研究では、MIP や NEMO を利用することを前提とした場合の、アドホックネットワーク通信方式について提案する。提案する通信方式は、既存の IP との親和性が良く、NEMO などの既存技術と協調して動作をすることが可能である。また、本稿では提案した通信方式を AODV を基に実装し、エミュレーションによる実現可能性の検証を行い、提案方式が実現できることを確認した。

A Design and Implementation of Vehicular Ad Hoc Networks for Internet Connectivity

AKIRA YOSHIOKA,[†] JUN KOSAI,[†] TERUHIKO HONDA[†]
 and KEISUKE UEHARA^{††}

Various services using vehicular communication including roadside-to-vehicle and vehicle-to-vehicle have been proposed in order to improve safety and comfort in vehicular environments. MIP and NEMO are considered to achieve seamless handover. In separately, MANET is considered for enhanced Car-to-Car communication. This paper proposes a new communication method for ITS communication. It can be used with NEMO. The method is implemented as enhancement of AODV. And the systems is evaluated by an emulation system in proof of concept.

1. 序 論

1.1 背 景

Intelligent Transport Systems (ITS) の分野では、安全運転支援を中心に様々なアプリケーションが検討されている^{1),2)}。これらのアプリケーションの多くは、路側機を路上に設置し、車両との間で直接通信を行うことを想定している。一方で、インターネットが広く一般的になり、自動車からインターネット上のサービスを利用する、あるいはインターネットと連携したシステムを構築するといったニーズがある。インターネット ITS 協議会³⁾では、自動車をインターネットに接続し、交通情報やヒヤリハット情報といったブロー

グ情報をインターネット上のサーバで処理したり、インターネット上で展開される店舗情報をカーナビゲーションと連動させたりするようなシステムを検討している。このような背景から、自動車のインターネットへの直接的な到達性も重要となりつつあるといえる。

以上のことより、現在、路上に設置した路側機を介して車両をインターネットに接続するような通信形態が検討されている。国内の狭域通信 (Dedicated Short Range Communication: DSRC) においても、狭域通信アプリケーションサブレイヤ標準規格⁴⁾を定めて本形態によるインターネット接続の実現を目指している。

しかし、路側機と車両の直接通信では、無線到達距離や大型車両による通信の遮蔽などにより、想定しているほど通信距離が得られず、アプリケーションが動作しないことがある。このような問題を解決する技術として、路側機の近隣に存在する車両を介した通信を実現する Mobile Adhoc Network (MANET) と呼ばれるマルチホップ通信技術が有望視されている。現在、

[†] 株式会社トヨタ IT 開発センター研究開発部
 Research & Development Division, Toyota Info Technology Center, Co., Ltd.

^{††} 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
 Graduate School of Media and Governance, Keio University

MANET のプロトコルの標準化は IETF の MANET WG⁵⁾ などで進められている。しかし、MANET WG で標準化されつつあるプロトコルは、アドホックネットワーク内の通信のみに着目しており、インターネットへの接続性を確保するためには別の技術を用いる必要がある。アドホックネットワークをインターネットに接続する技術については、同 WG 内で議論が行われているが、まだ個人ドラフトの段階であり⁶⁾、標準化までには時間を要する状態である。

1.2 研究の目的

本稿では、このような背景に鑑み、インターネットへの直接的な到達性を提供可能なマルチホップ ITS 通信方式を、既存のインターネットプロトコル (Internet Protocol: IP) との親和性を考慮したうえで提案する。提案する通信方式は、近隣の自動車へ情報を伝えることが可能であると同時に、インターネットへの接続性を提供する。また、インターネットプロトコルへの影響を最小限に抑えることにより、Network Mobility (NEMO)⁷⁾ などの既存のインターネット技術を使った路車間通信技術との親和性も良好に保つことを目標とする。

1.3 本稿の構成

本稿は、次のように構成される。2 章では、解決すべき問題点と、それを解決するためのアプローチについて述べる。3 章では、2 章で決定したアプローチに従い、検討しなければならない事項を要素技術として整理する。4 章では、さらに実際のアドホックネットワークプロトコルを適用する方法について考察しながら概略設計を行い、5 章ではその実装の詳細について述べる。6 章では、実際に実装したソフトウェアを用いた動作検証を行い、7 章で本稿を結ぶ。

2. 問題とアプローチ

2.1 関連研究と現状の問題点

MANET を用いて路側機の通信範囲を拡張するアプローチはドイツの Fleetnet プロジェクト⁸⁾ や Ohio 州大学⁹⁾ などですでに検討されている。しかし、これらの研究は通信プロトコルの動作に車両位置が必要であったり、インターネットへの直接的な到達性を提供できないなどの問題がある。

車両位置を用いたプロトコルは、ある程度正確な車両位置が必要となるため、GPS や Galileo などの測位システムの測位精度や利用可能性にプロトコル性能や安定性が影響を受ける。また、位置情報を持たないラップトップ型の計算機などをサービス対象とできないため、路側機が ITS 専用のアクセスポイントとな

り、事業的な費用対効果が低下するという問題もある。

また、インターネットへの直接的な到達性を提供できない場合、想定していないプロトコルを利用できないという問題がある。現在、Mobile IPv6 (MIPv6)¹⁰⁾ や NEMO を使って自動車をインターネットに接続する研究が進められている。これらの研究は一定の成果をあげ、広く利用可能な携帯電話などの広域通信メディアと、帯域などで利点を持つ無線 LAN などの狭域通信メディアを、シームレスに切り替えることに成功している¹¹⁾。これらのプロトコルは、IP 層において実現されており、自動車からインターネットへの直接的な到達性が提供されていないような場合には利用できない可能性が高い。

一方で、IEEE802.11 の s 作業部会 (Task Groups: TGs) ではリンク層において MANET のようなマルチホップ通信機能を提供する技術の検討を進めている。しかし、TGs では主に半固定状態のノードを対象としており、セグメントを構成するノードに認証情報などの初期設定を必要とする。このため、自由に移動する自動車などでは採用が難しいものとなっている。

2.2 要件とアプローチ

以上のことを整理すると、本研究で実現すべきマルチホップ ITS 通信方式は下記のような要件を満たさなければならないことが分かる。

- (要件 1) 通信範囲拡張に寄与できること。
- (要件 2) 自動車の移動モデルに対応できること。
- (要件 3) 既存のインターネットプロトコルとの親和性が良いこと。
- (要件 4) 位置情報などの通常の IP 通信で利用しない情報を必要としないこと。

前節でも述べたとおり、ITS 通信に MANET を適用する方法としては大きく次の 2 つが考えられる。

- (1) IP サブネットワーク内で実現する方法 (図 1 (a))
アドホックネットワークを 1 つの無線 LAN サブネットワークのように扱う。路側機が提供するアドホックネットワークをまたいで移動する場合、自動車が接続されるサブネットワークが代わるため、シームレスに通信することはできない。また、サブネットワークが代わるたびに新しく IP アドレスを取得する必要がある。
- (2) 経路制御を含む IP 層で実現する方法 (図 1 (b))
アドホックネットワークと路側機は独立に存在しており、そのときどきで路側機の近くに存在する自動車を介してインターネットに接続する。自動車の IP アドレスを基に経路制御が行われるため、自動車は 1 つの IP アドレスを使い続けることが可能であり、

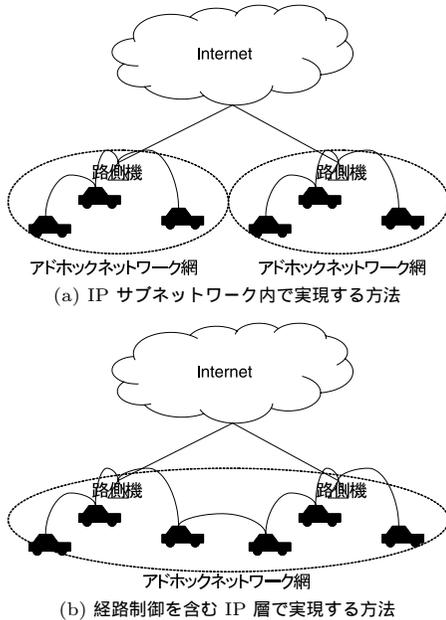


図 1 ITS 通信への MANET 適用

Fig.1 Applying MANET to ITS communications.

インターネットに接続するために利用している路側機が代わってもシームレスに通信を行うことができる。しかし一方で、インターネットとアドホックネットワークを結びゲートウェイ（路側機）で特殊な処理をする必要がある。

(2)の方がより大きな MANET ネットワークに対応可能であり、MANET WG での議論もこの方針を採用している。一方、(1)は(2)に比べて路側機をまたいで移動することができないという運用上の制約が大きい部分があるが、プロトコルの複雑化を防止できるため既存の IP との親和性が良い（要件 3）、アドホックネットワークのセグメント分けが明確であり渋滞時のようなアドホックネットワークが大きくなりがちな状況にも対応しやすい（要件 2）、NEMO などの既存の IP との親和性が高い（要件 3）というメリットがある。要件 1 および要件 4 はどちらの方法を採用しても実現可能であり、大きな差異はないと考えられる。そこで、前述したように ITS では MIP6 や NEMO の利用が検討されており、これによってサブネットワークをまたいだシームレスな通信が実現可能なことに鑑み、本研究では(1)の方針を採用し、ITS 分野で利用可能な技術を確立することとする。

3. 要素技術の検討

本章では、前章で決定したアプローチに沿って、通信手法に必要な要素技術を検討する。通信手法は、路

側機をアクセスポイントとしたリンク層セグメントを構成する手法で、極力既存の技術を踏襲することが要件となる。

3.1 要素技術

まず、本節では必要となる機能を整理し、要素技術に分割する。

前章の方針より、IP におけるサブネットワーク内でアドホックネットワークを実現する方法を考察する。IP におけるサブネットワークの要素としては、下記のような要素が存在する。

- IP サブネットワーク境界がグローバルに明確である。
- ブロードキャストなどの同報機能を有する。
- 同一サブネットワーク内ノードとの通信機能を有する。

次節以降で、それぞれの要素技術の実現方法について検討する。

3.2 IP サブネットワーク境界

IP では、そのサブネットワーク境界はグローバルに明確である。一方で、アドホックネットワークの場合、パケット中継のホップ制限を行った場合、各ノードからの見方によってサブネットワークが不明確となるという問題がある。たとえば、5つのノード A, B, C, D, E が直接通信できる距離が 1 ホップで順番に接続されていたとする。ここで、ホップ制限を 3 ホップとした場合、A から見ると B, C, D は同じネットワークに存在しているが、E は別のネットワークに存在していることになる。一方で、C から見た場合はすべてのノードへ 3 ホップ以内で到達可能であり、A, B, C, D, E が 1 つのネットワーク内に存在することとなる。

上記のような問題を解決するため、本研究では、IP サブネットワークを路側機を中心とした n ホップと定義するものとする。このことによって、IP サブネットワークは同じ路側機に接続されているどのノードから見ても同じものとなり、IP サブネットワークの境界がグローバルに明確なものとなる。

一方で、ノードから送信されたパケットのホップ制限を n ホップとした場合、1 番外側に存在するノードからのパケットは、反対の端に存在するノードへは届かないという問題が存在する。このため、移動するノードからのパケットのホップ制限 m は最低でも $2n$ 以上でなければならないことが分かる。

以上のことより、路側機から送信されるパケットのホップ制限を n とすることによってグローバルな IP サブネットワークを定義し、移動ノードから送信されるパケットのホップ制限を $m (> 2n)$ とすること

よって IP サブネットワーク内での到達性を確保する。

3.3 同報機能

IP サブネットワークでは、サブネット上に存在するすべてのノードにパケットを伝達するためのブロードキャスト機能が備わっており、様々なネットワーク制御に利用されている。自動車で構成されるアドホックネットワークを IP サブネットワークとして扱うためには、アドホックネットワーク上に同様な機能が必要となる。

アドホックネットワークにおいてすべてのノードにパケットを伝えるためにはフラッディングと呼ばれる技術が用いられる。フラッディングは、パケットを中継するノードが、次々とパケットを再送することによって、送信元ノードを中心として水紋が広がるようにパケットが伝達されていくことによって実現される。

本研究においても、フラッディング機能を用いることによってアドホックネットワーク内の同報機能を実現する。

3.4 同一サブネットワーク内ノードとの通信機能

IP サブネットワークでは、隣接ノードとの通信に必要なリンク層アドレスを取得するため、Address Resolution Protocol (ARP) や Neighbor Discovery Protocol (NDP) を利用する。その後、IP サブネットワーク内ではリンク層アドレスを使用して隣接ノードへ直接パケットが送られる。

しかし、今回検討しているアドホックネットワークの場合、同一 IP セグメントに存在するノードでも直接通信可能であるとは限らない。そこで、同一 IP サブネットワークに存在するノードへのパケットの配信方法を検討する必要がある。

同一 IP サブネットワークに存在するノードへのパケットの配信方法としては、次の 2 つをあげることができる。

- ホスト経路を使用することによる IP 層での中継
- リンク層アドレスを使ったリンク層での中継

リンク層での中継では、すべてをリンク層に隠蔽できるため IP 層に与える影響はほとんどなくなるが、経路制御表 (スパンニングツリー) などを新しく用意しなければならない、通信メディアごとに対応が必要などのデメリットがある。一方、IP 層での中継では、IP サブネットワークと隣接ノードが一致なくなるため注意が必要となるが、新しく経路表を用意する必要がない、通信メディアごとの対応が必要ないなどのメリットがある。

本研究では、IP 層での中継でも工夫をすることによって IP サブネットワークを形成することができる

と判断し、実装を簡素化することができる IP 層での中継手法を採用することとした。

4. 設 計

本章では、前節の要素技術の検討結果を受けて、IP 層でのパケット中継を基本としたマルチホップ ITS 通信方式の設計を行う。設計するマルチホップ ITS 通信方式は、日本国内だけでも 7,000 万台以上の自動車が存在することに鑑みて、IPv6 によって実現するものとする。

4.1 IP サブネットワーク境界と同報通信

IPv6 においては、ステートレス自動設定と呼ばれる手法によって、ノードに IP アドレスを自動的に割り当てることが一般的である。ステートレス自動設定では、ルータから送信されるルータ広告 (Router Advertisement: RA) によってプレフィックスがサブネットワーク上に流され、それを利用して各ノードが IP アドレスを決定する。また、RA はルータから送信されることを利用して、同時に各ノードはデフォルト経路を取得する。このような機構によって、IPv6 では自動的に IP サブネットワークが構成される。

本研究では、インターネットとアドホックネットワークを接続するルータにあたる機能は路側機が持つものとする。このようにすることによって、1 つの路側機の管理下に置かれるアドホックネットワークは、必ず同じネットワークプレフィックスを持つこととなり、インターネット側から見ると通常の路側機の裏に通常のサブネットワークが存在するものとして取り扱うことが可能となる。また、ルータである路側機から RA をホップ制限 n として送信することにより、サブネットワークを路側機を中心とした半径 n ホップと明確に定義することができる。

ここで RA は、すべてのノードが受け取ることが可能な、全ノードマルチキャストと呼ばれる一種のブロードキャスト IP アドレス (同報通信用 IP アドレス) を使って送信されることに注意が必要である。前章で述べたように、アドホックネットワーク内にパケットをブロードキャストするためには、フラッディング機能を実装する必要がある。また、全ノードマルチキャスト IP アドレスをフラッディング IP アドレスと読み替えることとする。

また、各ノードがデフォルト経路を取得するために RA の送信元 IP アドレスを利用していることにも注意が必要である。IPv6 では、全ノードマルチキャストを送信する場合には、送信元 IP アドレスとしてリンクローカル IP アドレスを用いなければならないと

規定されている。リンクローカル IP アドレスとは、IPv6 アドレスの一種で、セグメント内での一意性のみを保証した IP アドレスであり、セグメント内通信のみでの利用が許されている。このため、ルータがリンクローカル IP アドレスを持つパケットを中継することはない。しかし、本研究の環境では、アドホックネットワークを介して、つまり別のノードに中継されてパケットがデフォルトルータまで到達する。このため、デフォルトルータの IP アドレスとして、リンクローカル IP アドレスを使用することができない。そこで、RA の送信元 IP アドレスとして、ルータによる中継が可能であるグローバル IP アドレスを利用するものとする。

4.2 サブネットワーク内のノードの探索方法

IPv6 では同一サブネットワーク内のノードのアドレス解決のために近隣探索プロトコル (Neighbor Discovery Protocol: NDP) の近隣要請 (Neighbor Solicitation: NS) および近隣通知 (Neighbor Advertisement: NA) を利用する。NS は、要請マルチキャスト IP アドレスと呼ばれる特殊な IP アドレスに宛てて送出され、同一セグメント上に存在するノードのみに到達する。このため、アドホックネットワークを形成する各ノードで中継されず、結果的に各ノードへ届けることはできない。

そこで、近隣ノード探索にアドホックネットワークが持つ機能を適用することを考える。プロアクティブ型のアドホックネットワークプロトコルでは、各ノードはあらかじめ経路情報を交換しているため、アドホックネットワーク上に存在するノードに対する経路をすでに所有している。このことから、近隣ノードの探索に NDP を利用する必要はない。また、リアクティブ型のアドホックネットワークプロトコルでは、経路探索と呼ばれる仕組みを持っており、目的のノードまでの経路を探索することができる。経路探索は意味的には IPv6 における NDP と同等のものであり、NDP の代わりに経路探索を用いることが可能である。

5. 実装

本章では、4 章で検討した設計に基づいた実装について述べる。

5.1 実装環境

まず、前章で設計したマルチホップ ITS 通信方式を実装するにあたり、用いた環境について述べる。

本研究では、実装のための環境として NetBSD2.0 と IPv6 化された AODV-UU¹²⁾ を用いた。NetBSD2.0 は BSD 系のオペレーティングシステムであり、IPv6

の基本的な機能が実装されている。また、AODV-UU はリアクティブ型の MANET プロトコルの 1 つである Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV)¹³⁾ の実装の 1 つである。AODV-UU は Linux 上で動作するように実装されているが、本研究ではこれを NetBSD2.0 上に移植して利用した。MANET プロトコルとして AODV を採用した理由は、自動車は頻繁に移動するため、プロアクティブ型で経路をメンテナンスするためには頻繁な経路情報交換が必要となり、プロトコルオーバーヘッドが大きくなると考えたためである。

5.2 ルータ広告

前章で検討した IP サブネットワークを構成するための RA については、下記の 3 項目を実装することで 4.1 節で述べた仕様を実現した。

5.2.1 ルータの rtadvd の変更

ルータからの RA は、NetBSD2.0 では rtadvd と呼ばれるデーモンプログラムによって送信される。ルータから送信される RA のホップ制限および送信元 IP アドレスを変更するため、下記の変更を施した。

- ホップ制限を指定できるコマンドラインオプションを追加。
- RA の送信元 IP アドレスにリンクローカル IP アドレスではなくグローバル IP アドレスを使用するよう変更。

5.2.2 カーネルの変更

NetBSD2.0 のカーネルでは、ホップ制限が 0 でない RA や送信元 IP アドレスがリンクローカル IP アドレスでない RA を異常なパケットとして破棄する仕様となっている。そこで、これらの RA を正常なパケットとして処理するよう、カーネルに変更を加えた。これにより、ルータより送信された変更済み RA を受信したノードは、ステートレス自動設定で IP アドレスおよびデフォルトルータを設定することが可能となる。このとき、デフォルトルータはグローバル IP アドレスが使用される。

5.2.3 aodvd へのフラッディングの実装

RA を路側機から半径 n ホップに配信するためには、要請マルチキャスト IP アドレス宛てに送信されたパケットをフラッディングする仕組みが必要である。この仕組みを AODV-UU を実現するデーモンプログラムである aodvd に実装した。実際には、Barkley Packet Filter (BPF) を使用することにより要請マルチキャスト IP アドレス宛てのパケットを取得し、ホップカウントを 1 つ減らして再送する仕組みを実装した。また、一度再送したパケットを何度も再送しないように

ループ回避のための仕組みも同時に実装した。ループ回避には下記のような仕組みを用いた。

- 受信した RA パケットのハッシュ値を MD5¹⁴⁾ で計算する。この際、ホップカウントには 0 を入れておく。
- 自分が持つ MD5 キャッシュと同じ値を持つエントリがない場合は、ホップカウントを 1 つ減らしてパケットを再送し、MD5 キャッシュに計算した MD5 の値を格納する。同じエントリがあった場合には、パケットを破棄する。
- MD5 エントリは、最終参照時刻から一定時間が経過したら破棄する。

5.3 隣接しないノードの探索

4.2 節で述べたように、隣接しないノードの探索には、AODV における経路探索 (Route Request: RReq) と経路応答 (Route Reply: RRep) を用いる。これを実現するため、次の実装を行った。

- カーネルが送信する近隣要請 (NS) をユーザプログラムで取り出す API とカーネルに NDP が終了するまで一時的に蓄積されるパケットを再送信する API を socket として実装。
- aodvd において、上記の API を用いて NS が送出されるタイミングを取得し、aodvd より RReq を送出する処理を実装。
- aodvd において RRep を受信した際に、カーネルに NDP が終了するまで一時的に蓄積されるパケットを再送信する処理を上記 API を使用して実装。

5.4 再帰的な経路表探索

本実装では、アドホックネットワーク全体を 1 つのサブネットワークのように扱うため、アドホックネットワークとしては数ホップ先のルータの IP アドレスが、IP 層としては同一サブネット上に存在しているものとして、次ホップルータとして指定される可能性がある。この場合、現状の NetBSD2.0 の実装では、パケット中継の際に次ホップルータへ直接到達できないため、パケットが破棄される。そこで、再帰的に経路表を探索する機能をカーネル内に追加することで、次ホップルータへの到達性がない場合でも、隣接するノードにパケットを送ることができるようにした。

6. ブリッジエミュレータを用いた評価

本研究では、開発したマルチホップ ITS 通信方式をブリッジエミュレータを用いて評価した。

6.1 評価システム

本研究が対象とするような、多数の自動車がアド

ホックノードとして動作する環境を実験的に確認することは、下記のような理由から難しい。

- 大規模な実験を要することによる高コスト
- 無線部分の不安定さと経路制御などのアドホックネットワーク仕様の部分の課題の分離の困難さ
- 再現性を保つことの難しさ

そこで、4 章および 5 章で提案した設計・実装が正しく動作することを、多数の Ethernet ポートを持つエミュレータを用いて確認することとした。

今回、FreeBSD に実装されている遅延やエラーを発生させるための仕組みである dummynet¹⁵⁾ を利用することによって、移動により変化するノード間の通信状態 (パケットエラー率、遅延) を模擬できる環境を構築した。また、下記のような状態を同時にリアルタイムでモニタするための環境も構築した。

- 移動する各アドホックノードの位置関係
- ブリッジエミュレータで実現しているリンク接続の状態
- 各アドホックノードでの経路情報

6.1.1 評価システムの構成

図 2 にエミュレーション環境のシステム構成を示す。同環境は下記の構成要素からなる。

(1) 各アドホックノード

無線接続を有線 Ethernet 接続で模擬する (図 2(a) 参照)。指定したホスト (下記のビューアを動作させる) に経路表の内容を定期的に送信する。

(2) ブリッジエミュレータ

多数の Ethernet ポートを有し、(1) からの Ethernet を接続する (図 3 参照)。dummynet を用い、すべての 2 ポート間遅延時間とパケットエラー率を指定することで、リンク層による無線接続状態を模擬する。

(3) コントローラ

ノードの移動シナリオ、簡易電波伝播モデルを入力し、ある時刻におけるある 2 ノード間の無線接続状態を生成し、(2) に指示する。同時に表示用に、同指示内容、各ノードの位置を (4) に通知する。

(4) ビューア

(1) の各アドホックノードからの経路表情報および (3) のコントローラからのリンク層接続情報、各ノードの位置情報を受信し、それらをあわせて表示する。

ハードウェアとしては、下記を使用した。

(1) アドホックノード

将来車載してのフィールド実験が可能ないように、小型のボードコンピュータ Soekris 社製の net4826 (x86 互換 266 MHz CPU, 128 MB メインメモリ, 64 MB Flash ROM) を使用した。

(2) ブリッジエミュレータ

通常のデスクトップ向け PC に PCI 接続の 4 ポート Ethernet カードを 5 枚搭載し、20 ノードまでのアドホックネットワークのエミュレーションを可能とした。

6.1.2 各アドホックノードの経路表の把握

前項で述べたように、各アドホックノードが経路表の内容をビューアに定期的に報告することにより、アドホックネットワーク全体の状況を把握する。このため、AODV を実現するデーモンプログラムである aodvd に、指定したホストに対し指定する間隔で、経路表情報（宛先 IP アドレス、同 IP アドレスに対する次ホップ、宛先までのホップ数、有効/無効状態のリスト）を報告する機能を実装した。

6.1.3 無線接続の模擬

ブリッジエミュレータと各アドホックノードとは、100BaseTX で接続した。このため、下記の点で実際の無線環境とは大きく異なる。

- パケットエラーがほとんどない。
- ほぼ瞬時に接続/切断がスイッチできる。

一般の無線システムは、無線という接続が不安定になりやすい条件のもとで、なるべく安定した通信を実現するため、多くの場合に下記のような機能を採用している。

- 接続時はある程度条件が安定するのを待ってから下位層での接続処理を行った後、上位層で通信可能となる。
- 接続状態においても、それほど多くないパケットエラーが発生している状態では必要に応じて下位層で再送処理をしつつ接続状態を維持する。
- 一時的に無線条件が悪化し、下位層での再送でもパケットが到達しないような状態になっても、即座には切断せず一定時間までは接続状態を維持する。
- あらかじめ規定した時間上記のように無線状態が悪化したままとなった場合、切断処理を行う。

この結果、ある 2 ノード間の通信に着目した場合、上位層からの観測では下記のような現象が観測される。

- 接近時には、あるところで突然通信可能状態となり、その後良好な通信状態を保つ。
- 離脱時には、条件が悪化しつつある中で、下位層での再送処理をして接続を維持するため、次第に遅延、パケットエラー率が増加し、さらに条件が悪化したところで切断すなわち通信不可となる。

そこで、本システムでは接近時と離脱時のそれぞれについて遅延、パケット到達率を 2 ノード間の距離に対して段階的に設定を可能とする仕様とした。次節で

表 1 簡易電波伝搬モデル
Table 1 Propagation model.

	ノード間距離	パケット到達率	遅延
接近時	無限遠 ~ 100 m	0%	—
	100 m ~ 0 m	100%	20 msec
離脱時	0 m ~ 100 m	100%	20 msec
	100 m ~ 120 m	90%	25 msec
	120 m ~ 130 m	75%	30 msec
	130 m ~ 140 m	50%	40 msec
	140 m ~ 無限遠	0%	—

表 2 評価システムの能力
Table 2 Ability of evaluation system.

移動	モデル	定速での直線的な動きおよびその組合せのみ模擬可能。
	台数	20 台までであればコストを増やすことなく対応可能。それ以上の台数の場合にはシステムを拡張する必要がある。
通信	電波伝搬	到達距離に基づく単純なモデルを採用しておりある程度現実的な遅延やパケットエラー率を再現できる。一方、回折やマルチパスなどの電波伝搬に関する挙動がまったく考慮されていない。また、複数のノードが同時に電波を出したときの衝突なども考慮されていない。
	リンク層	ソフトウェアブリッジを採用しているため、パケットの衝突などに対応できない。
	IP 層	遅延やパケットエラー率などに関して、実際のシステムを通した値を測定することができる。

の述べるエミュレーション例の際に指定したプロファイル例を表 1 に示す。

6.1.4 ノード移動シナリオの入力

コントローラには、あらかじめファイルに記述した移動シナリオを入力する。ここでは、各ノード ID ごとに初期位置 (x0, y0) および次の位置 (x, y)、その位置までの移動時間 (秒) を必要数繰り返して記述する簡易な記述方式を採用した。本方式は簡易ではあるが、任意の中継地点を指定できることから、柔軟な移動経路を記述できる。なお、ある地点から次に指定する地点への移動は等速とした。

6.1.5 評価システムの能力

本項では、今回用いたブリッジエミュレータを基にした評価システムの能力について整理する。

本節で検討した評価システムでは、移動モデルおよび電波伝播などリンク層以下の通信環境について制限がある。一方で、再現性や台数制限などで実車実験に対する優位性もある。これらの能力を表 2 にまとめる。

6.2 エミュレーションによる評価結果

たとえば交差点における車両への情報提供を想定した場合には、路側機相当のノードを固定（非移動）

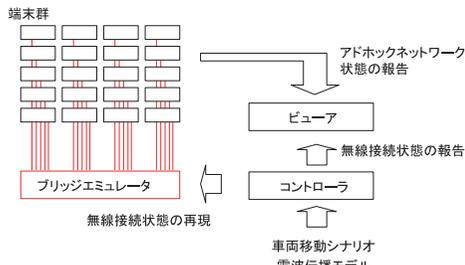
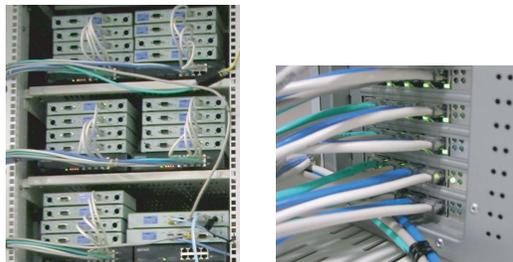


図 2 エミュレータのシステム構成
Fig. 2 Configuration of emulation system.



(a) アドホックノード群 (b) ブリッジエミュレータ背面

図 3 ブリッジエミュレータと各アドホックノードの接続
Fig. 3 Ad hoc nodes and bridge emulator.

し、残りのノードを移動させるシナリオが妥当である。一方、現象が単純で状況を理解しやすいのは多数のノードを固定し、1ノードだけを移動させるシナリオである。

今回考案したエミュレータでは、車両配置、速度について多様な条件でのエミュレーションが可能であるが、本稿では、提案したプロトコル拡張部分の評価を目的とし、図 4 (a)~(f) に示すような、1 固定ノード + 多数の移動ノードのシナリオについて報告する。なお、電波伝播モデルは表 1 に示したものをを用い、その他のパラメータとしてはノード間隔 100 m、移動速度 20 m/s とした。

このシナリオにおける左端のノードから固定ノードまでの遅延およびパケットエラー率を図 5 に示す。測定は、11 回行い平均を示した。初めは 6 ホップの距離があるため、約 250 ms の遅延があるが、その後、だんだん遅延が小さくなり、最終的には 50 ms ぐらいにまで小さくなる様子が分かる。ただし、途中に 2 カ所の飛び出た点があり、これは経路の切替わりが多く発生している地点と一致しており、経路探索のためにパケットがノードのバッファにたまったものと考えられる。

また、この実験における初めにパケットが到達してからパケットがまったく届かなくなるまでのパケットエラー率は、ノード間隔とパケット到達率 100%の限

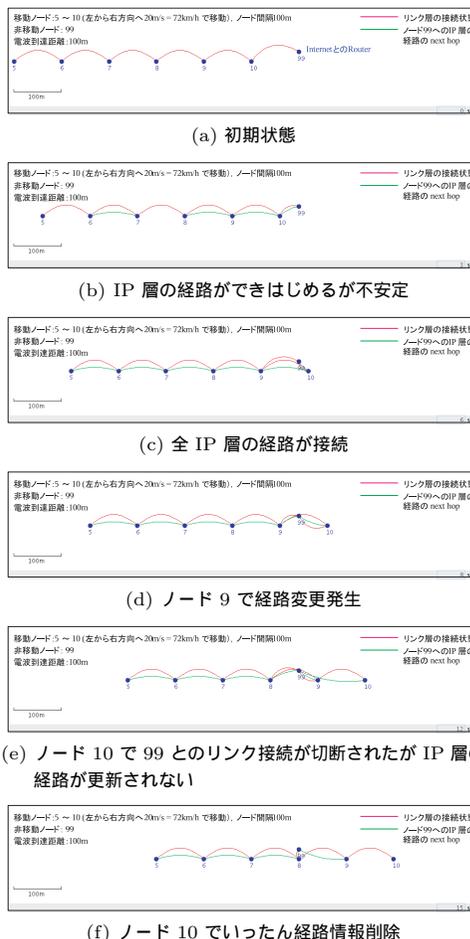


図 4 エミュレーション例：1 固定ノードと多数の移動ノードのケース

Fig. 4 Emulation with one fixed node and several mobile nodes.

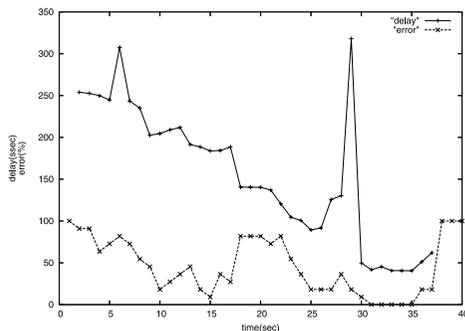


図 5 シナリオにおける遅延とエラー率の変化
Fig. 5 Delay and error ratio.

界距離とが等しいという厳しい条件にもかかわらず、約 40%であった。

7. 結 論

自動車向け路車間通信をマルチホップ利用により拡張するためのアドホックネットワークに必要な機能を整理し、AODV に対する拡張を提案・実装した。また、仕様・実装段階に適した低コストで再現性の高い評価手法として、エミュレーション環境を構築し、上記提案・実装が期待どおりに実現されていることを確認した。

提案した通信方式は、GPS などの測位デバイスがなくとも動作し、また、NEMO などのすでに利用が検討されている既存の IP 層プロトコルやステートレス IP アドレス自動設定などの一般的な IPv6 の仕組みとも同時に利用することが可能である。

今後の課題としては、より広範に入力条件を変化させたエミュレーション評価、実際に車両を用いた実験を行う場合に必要な動作条件の絞り込み、実車による実験の実施などをあげることができる。

参 考 文 献

- 1) 国土技術政策総合研究所：AHS 早期実現化を目指す 7 つのサービス．<http://www.nilim.go.jp/japanese/its/2reserch/1field/2ahs/ahs5.htm>
- 2) 国土交通省先進安全自動車（ASV）推進検討会：先進安全自動車（ASV）情報交換型運転支援システム．<http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/asv/ASV3HP/syasyakannhanfu/gizyutusetumei.pdf>
- 3) インターネット ITS 協議会．<http://www.internetits.org/>
- 4) 財団法人電波産業会：狭域通信（DSRC）アプリケーションサブレイヤ標準規格，ARIB Std-T88.
- 5) Internet Engineering Task Force: Mobile Ad-hoc Networks (manet). <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- 6) Wakikawa, R., Malinen, J.T., Perkins, C.E., Nilsson, A. and Tuominen, A.J.: Global Connectivity for IPv6 Mobile Ad Hoc Networks. <http://tools.ietf.org/wg/manet/draft-wakikawa-manet-globalv6-05.txt>
- 7) Devarapalli, V., Wakikawa, R., Petrescu, A. and Thubert, P.: Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol, IETF RFC3963 (Jan. 2005). <http://www.ietf.org/rfc/rfc3963.html>
- 8) Bechler, M., Wolf, L. and Franz, W.: Mobile Internet Access in FleetNet, *13th Fachtagung Kommunikation in Verteilten Systemen KiVS 2003*, Leipzig, Germany (Feb. 2003).
- 9) Korkmaz, G., Ekici, E. and Ozguner, F.: A New High Throughput Internet Access Pro-

ocol for Vehicular Networks, *The 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2005)* (Sep. 2005).

- 10) Johnson, D., Perkins, C. and Arkko, J.: Mobility Support for IPv6, IETF RFC3775 (June 2004). <http://www.ietf.org/rfc/rfc3775.html>
- 11) 遠山祥広, 塚田 学, 植原啓介, 砂原秀樹, 村井純：インターネット自動車のテストベッドの構築と評価, 情報処理学会研究報告第 6 回コピキタスコンピューティングシステム, pp.37-43 (Nov. 2004).
- 12) Uppsala University: AODV-UU Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing. <http://core.it.uu.se/index.php/AODV-UU>
- 13) Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S.: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, IETF RFC3561 (July 2003).
- 14) Rivest, R.: The MD5 Message-Digest Algorithm, IETF RFC1321 (Apr. 1992).
- 15) Rizzo, L.: Dummynet. http://info.iet.unipi.it/~luigi/ip_dummynet/

(平成 18 年 10 月 31 日受付)

(平成 19 年 4 月 6 日採録)



吉岡 顕 (正会員)

1991 年東京大学大学院工学系研究科原子力工学専攻博士課程修了。大規模有限要素法のための並列・分散処理手法に関する研究により博士号取得。1992 年東京大学大型計算機センター助手, 1997 年同教育用計算機センター助教授, 前者では大規模計算のためのスーパーコンピュータの運用および利用教育, 後者では学内教育用システムのシステム構築, 運用にあたる。2001 年より (株) トヨタ IT 開発センターに勤務, 自動車向けネットワーク技術およびその評価技術に関する研究開発に従事。



小佐井 潤

1998 年岐阜大学工学部電子情報工学科卒業。2000 年同大学院電子情報工学専攻博士前期課程修了。同年 (株) デンソー入社。2004 年 (株) トヨタ IT 開発センターに出向。クルマ向け通信技術, 特にモビリティ管理, ルーティング方式, アドホックネットワークの研究に従事。電子情報通信学会会員。



本多 輝彦

1987年国際電信電話(現KDDI)(株)入社,衛星通信・無線通信システムに関する研究,開発に従事。2003年(株)トヨタIT開発センターに出自,次世代の自動車向けネットワーク

技術に関する研究開発に従事。電子情報通信学会会員。



植原 啓介(正会員)

2003年慶應義塾大学より博士(政策・メディア)の学位を取得。現在,慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科特別研究准教授。インターネット移動体通信,インターネットITS,

インターネットにおける地理位置情報利用等の研究に従事。NPO法人高度測位社会基盤研究フォーラム理事,インターネットITS協議会技術委員会副委員長等を務める。
