

卒業論文 2002年度 (平成14年度)

MANETを用いた車車間マルチホップ通信環境の構築

慶應義塾大学 環境情報学部

氏名：岡田 耕司

指導教員

慶應義塾大学 環境情報学部

村井 純

徳田 英幸

楠本 博之

中村 修

南 政樹

## MANET を用いた車車間マルチホップ通信環境の構築

本研究では、インターネット自動車における車車間マルチホップ通信環境を MANET を用いて実現する。現在、提案されている MANET ルーティングプロトコルの中から TBRPF を選択し、BSD 上に実装した。

現在、自動車の情報化の流れの中で、ITS (Intelligent Transport Systems) の活動に注目が集まっている。ITS は、自動車を情報化することで、道路交通の安全化と効率化を行うことを目指し、様々な技術開発を行っている。

また、自動車の情報化をインターネットの視点から見たプロジェクトとして、インターネット自動車プロジェクトがある。インターネット自動車プロジェクトは、その通信環境として、インターネットを用いることで、汎用的な通信環境を車内に提供している。

本研究では、インターネットの技術を用いて車車間マルチホップ通信環境を構築することで、自動車間における汎用的、かつ効率的な通信環境を構築する。本研究により、インターネット自動車のモデル上で車車間マルチホップ通信を行うことが可能となった。

### キーワード

1. 車車間通信 , 2. MANET , 3. TBRPF ,

慶應義塾大学 環境情報学部

岡田 耕司

A suitable environment for multi-hop inter-vehicle communications  
with MANET

This paper proposes a suitable environment for multi-hop inter-vehicle communications with MANET. We decided to implement TBRPF in the BSD operating system because TBRPF was found to be the most suitable protocol for this environment.

Since automobiles are more and more embedded with information technologies, ITS activities (Intelligent Transportation Systems) has recently deserved a lot of public attention. By computerizing vehicles, ITS aims at improving vehicle and traffic safety and efficiency.

The versatile communication environment needed by automobiles can be achieved by using Internet technologies. This is investigated by the InternetCAR project which uses Internet technologies for the communication infrastructure between automobiles.

This study demonstrates how vehicles can be connected to the Internet by using inter-vehicles mutli-hop communications. We have achieved an efficient communication environment using the MANET TBRPF protocol.

Keywords :

1. inter-vehicle communication, 2. MANET, 3. TBRPF,

Keio University , Faculty of Environmental Information

Kouji Okada

# 目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本論文の目的	2
1.3	論文の構成	2
第2章	自動車通信環境	3
2.1	自動車を取りまく現在の通信環境	3
2.2	車車間マルチホップ通信	4
2.2.1	想定アプリケーション	5
2.3	インターネットを用いた通信	6
2.3.1	インターネット自動車プロジェクト	6
2.4	現在の車車間通信	7
2.4.1	CHAUFFEUR, CHAUFFEUR II	8
2.5	これからの自動車通信環境	8
第3章	車車間通信における MANET(Mobile Ad-hoc Network)	11
3.1	車車間通信	11
3.1.1	本研究における車車間通信の形態	11
3.1.2	インターネット自動車における車車間通信環境への要求	12
3.2	MANET の概要	12
3.3	各プロトコルの比較	14
3.3.1	DSR(Dynamic Source Routing)	14
3.3.2	AODV(Ad-hoc On Demand Distance Vector)	14
3.3.3	OLSR(Optimized Link State Routing)	14
3.3.4	TBRPF(Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding)	15
3.4	車車間通信で用いる MANET ルーティングプロトコルの選択	15
第4章	TBRPF の設計と実装	17
4.1	実装概要	17
4.1.1	実装要求	17
4.1.2	実装環境	17
4.2	モジュール設計	18
4.3	TBRPF Neighbor Discovery	19

4.3.1	メッセージ送信部 . . . . .	19
4.3.2	メッセージ受信部 . . . . .	20
4.4	TBRPF Routing Module . . . . .	21
4.4.1	ローカルリンク部 . . . . .	21
4.4.2	メッセージ部 . . . . .	23
4.4.3	ルーティング部 . . . . .	27
<b>第5章</b>	<b>評価実験</b>	<b>30</b>
5.1	実験概要 . . . . .	30
5.2	実装動作実験 . . . . .	30
5.2.1	実験環境 . . . . .	30
5.2.2	実験 . . . . .	31
5.3	自動車における実証実験 . . . . .	32
5.3.1	評価項目 . . . . .	32
5.3.2	実験環境 . . . . .	33
5.3.3	実験概要 . . . . .	33
5.3.4	実験評価結果 . . . . .	36
5.4	実験考察 . . . . .	37
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>38</b>
6.1	まとめ . . . . .	38
6.2	今後の課題 . . . . .	38

# 目次

2.1	自動車を取りまく通信環境 . . . . .	3
2.2	車車間マルチホップ通信の例 . . . . .	5
2.3	インターネット自動車の通信モデル . . . . .	7
2.4	インターネット自動車のモデル . . . . .	9
3.1	MANET トポロジ概念 . . . . .	13
4.1	モジュール相関図 . . . . .	18
4.2	Neighbor Table の構成 . . . . .	19
4.3	HELLO パケットフォーマット . . . . .	20
4.4	ノード情報/リンク情報 . . . . .	22
4.5	アップデートメッセージフォーマット . . . . .	23
4.6	アソシエーションテーブル . . . . .	24
4.7	アソシエーションメッセージフォーマット . . . . .	25
4.8	経路表の例 . . . . .	29
5.1	実験トポロジ . . . . .	31
5.2	収束時間の計測 . . . . .	32
5.3	実験初期時 . . . . .	33
5.4	加速追い抜き実験 . . . . .	34
5.5	減速追い抜き実験 . . . . .	35
5.6	停車実験 . . . . .	35
5.7	到達性 . . . . .	36

# 表 目 次

2.1	既存技術の比較 . . . . .	10
3.1	MANET ルーティングプロトコルの比較 . . . . .	16
4.1	実装環境 . . . . .	17
4.2	使用アドレス/ポート . . . . .	19
5.1	動作実験環境 . . . . .	30
5.2	アドレス/インターフェース対応表 . . . . .	31
5.3	実験環境 . . . . .	33

# 第1章 序論

本章では、本論文の背景、目的を整理し、また、本論文の構成を示す。

## 1.1 背景

現在日本国内の自動車台数は7500万台とも言われ、私たちの生活にとって自動車の存在は欠かせないものとなっている。近年、その自動車が持つ情報を自動車内のみで利用するのではなく、自動車外部に公開することによって新しい自動車の利用形態を模索する動きがある。ITS ( Intelligent Transport Systems ) の活動もそのような自動車の情報化への動きであり、日本では国土交通省 [1] をはじめ官庁主導のもと多くの企業、組織で車を取り巻くネットワークを用いた新しいサービスを展開し始めている。

自動車の情報化を議論するために、自動車内における情報発信元を整理する。主な情報発信元として自動車内には多種多様なセンサが存在し、これらの情報に基づいてコンピュータが自動車の制御を行っている。それらの自動車内に存在する情報を組み合わせると、これまでにないサービスを展開することができる。例えば、自動車間で、車両のスピードやブレーキ状態等の車両走行状態や、アクセル開度やハンドル回転角等の車両制御情報を交換する事で、自動車同士の協調作業を支援する事が可能となり、結果として、交通事故や交通渋滞等さまざまな交通問題を解決できる。

また、自動車内に自動車外部から情報を提供するシステムとして、G-BOOK[2] や CARWINGS[3] 等、ユーザの視点にたった自動車の情報化の実用例も出始めている。G-BOOK とは、車載端末、パソコン、PDA をターゲットにした、自動車用情報提供サービスであり、CARWINGS とは、自動車内に独自の配線をもち、自動車に携帯電話を接続することで、車載端末やナビゲーションシステムなどの対応デバイスに、ダウンロードした情報を反映することができるシステムである。

さらに、インターネットを用いた自動車の情報化プロジェクトとして、インターネット自動車プロジェクトがある [4]。WIDE プロジェクト??が中心となり活動しているインターネット自動車プロジェクトは、メディアとしてインターネットを用いることで、自動車の情報化を行ってきたプロジェクトである。ノードが移動しないことを前提としてきたこれまでのインターネットに代わる、自動車のための移動通信環境を定義し、技術開発と、技術の検証を行っている。

本研究で対象とする車車間通信は、走行中の自動車間で情報交換を行う事で、自動車の利便性を向上させるための技術である。例えば、各自動車の制御情報を交換する事で、交通管理を行う事が容易になる。あるいは、前を走る自動車のGPSにおける位

置情報とその自動車からの自車の相対位置を知ること、GPS 機材を搭載することなく正確な位置情報を取得することができる。自動車内のそれらの情報を組み合わせることで、多様なサービスを展開することが可能になる。

現在、インターネット自動車が提案する、自動車の通信モデルは、インターネットに存在するノードと自動車内のノードの通信を定義するものであり、自動車間で情報交換を行うような場合においても、一旦外部のネットワークを介した上で、通信を行うことになる。本研究では、インターネットの技術を用いて、車車間で直接通信を行う環境を構築する。

## 1.2 本論文の目的

本論文では、インターネット自動車における車車間通信環境において、Mobile Ad-hoc Network(MANET)[5]の技術を用いることの有用性を検証する。そのために、MANET ルーティングプロトコルの1つである TBRPF(Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding)[6]を draft-ietf-manet-tbrpf-06 に基づいて実装した。そして、その TBRPF の実装をもとに、実車環境で、MANET を用いた車車間マルチホップ通信の評価を行った。

## 1.3 論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第2章では、自動車が構築するネットワークの整理を行った上で、現在行われている、車車間通信の試み、インターネット自動車の通信環境を考察し、これからの車車間通信環境における要求を整理する。第3章では、MANET(Mobile Ad-hoc Network)に関する技術の整理を行い、結果、TBRPF を本研究で選択した理由を示す。第4章では、本研究で使用する MANET ルーティングプロトコルである TBRPF の実装について述べる。第5章に、本研究における MANET を用いた車車間通信環境の評価について述べる。第6章に本研究のまとめを示し、結論とする。

## 第2章 自動車通信環境

本章では、ITS やインターネット自動車プロジェクトの活動をもとに、自動車を取り巻く通信環境について整理し、議論する。現在の自動車通信環境を整理することで、車車間通信環境に対する要求を整理し、インターネット自動車における車車間通信環境のモデルを提案する。

### 2.1 自動車をとりまく現在の通信環境

自動車を中心に形成されるネットワークには様々な種類のものがある。以下にそれらのネットワークとその通信形態を整理する。図 2.1 に、自動車通信環境を示す。

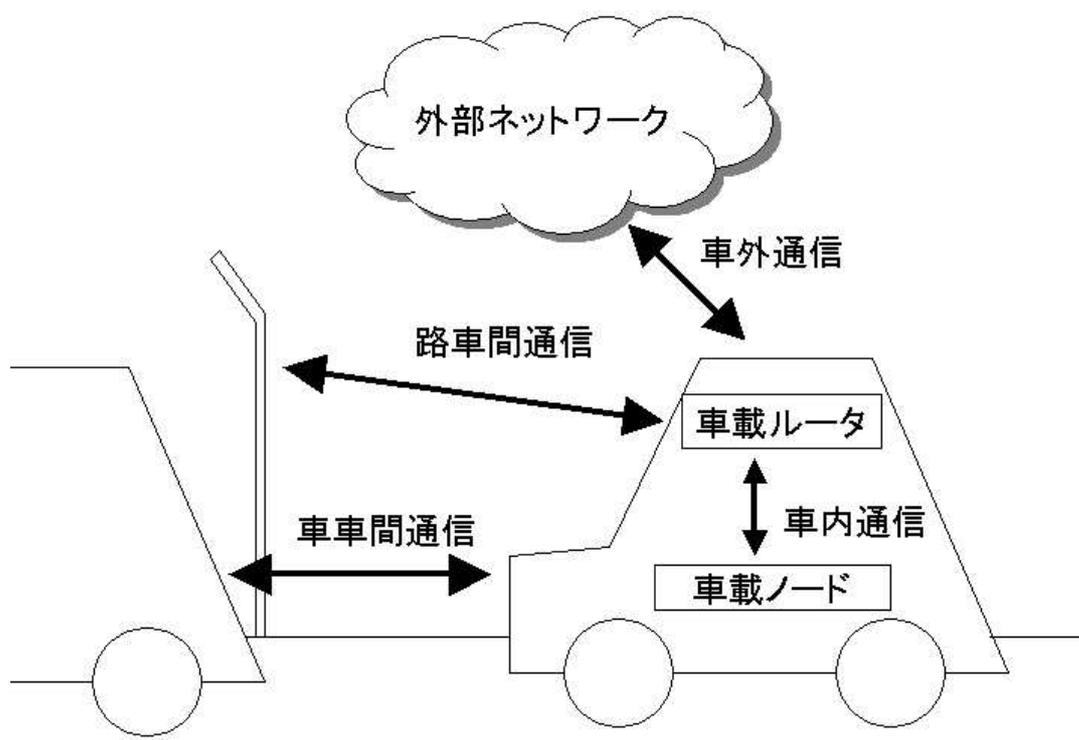


図 2.1: 自動車をとりまく通信環境

## 路車間通信

路車間通信とは、自動車と道路間の通信を示す。自動車と道路間で情報を交換することで、道路交通の円滑化や交通事故回避を行うことが可能となる。現在の実用例としては、有料道路自動料金収集システム (ETC: Electronic Toll Collection System) や、ビーコンを用いた道路交通情報配信システム (VICS: Vehicle Information and Communication System) がある。

## 車外通信

本論文では、車外通信という用語を、自動車と外部のネットワーク上に存在するノード間での通信を表すために用いる。この通信は、携帯電話や衛星通信などのメディアを用いて、自動車内のノードが安定的な通信を得るために用いられる。現在の実用例としては、GPS 測位システムにおける自動車と衛星間の通信や、CAR-WINGS などのシステムに用いられている。

## 車内通信

車内通信とは、自動車内に存在するセンサノードや、搭乗者が持ち運ぶ個人端末等の車載ノード間で行われる通信である。車内のセンサノード同士の協調や、搭乗者間の通信、個人端末と車載ルータ間での通信に用いられる。

## 車車間通信

車車間通信とは、走行中の自動車同士で行う通信である。車車間通信では、動的にネットワークの構成を変えながら通信を行う。車車間ネットワークにおいて、ネットワークに参加する自動車は時々刻々と変化する。車車間通信は、一般的に車群と呼ばれる自動車集合において行われる。本研究は、車車間通信の中でも、車車間におけるマルチホップ通信に議論を絞る。

## 2.2 車車間マルチホップ通信

車車間マルチホップ通信とは、車車間通信の中でも、特にデータの送信元ノードと、データの宛先ノードの間に、データを中継するノードを必要とする通信のことである。車車間マルチホップ通信の例を図 2.2 に示す。図 2.2 において、自動車 A が、自動車 C に音楽ファイルを転送しようとするとき、自動車 A が装備する無線デバイスの到達範囲に自動車 C が存在していなかった場合、自動車 B がそのデータを中継し、自動車 A から自動車 C にデータを送信できる。また、渋滞を検知した自動車が、後続車に対してマルチホップで渋滞検知情報を公開することにより、後続車は、渋滞を避け、新たに目的地までの経路を検索しなおすことができる。

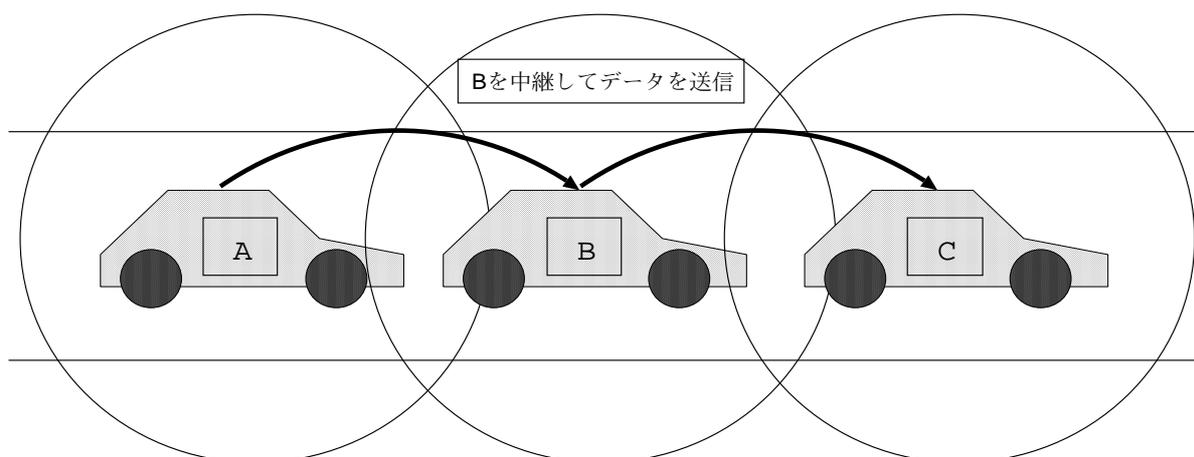


図 2.2: 車車間マルチホップ通信の例

車車間マルチホップ通信を実現するためには、以下の2つの技術が要求される。

- 自動車間をつなぐリンク技術

高速で移動する自動車間で利用する無線リンク技術に対する要求がある。近年では、ETCに利用されている、5.8Ghz周波数帯を用いた狭域通信(DSRC: Dedicated Short Range Communications)[7]方式による車車間無線技術が提案されている。DSRCは、使用電波帯域を気象レーダなどと同じのものを用いているが、その通信範囲を半径数十メートルから数百メートルとしており、干渉のおそれが少ないため、電波の再利用性という観点からも有望視されている。

- 自動車によるアドホックネットワーク形成技術

アドホックネットワークは、主に移動体同士での経路決定に用いられ、近隣にいるノード同士でネットワークを形成し、互いに通信を行うための技術である。先述したように、車車間通信において、ネットワークの構成は時々刻々と変化する。そのため、動的に位置が変化する通信相手を許容する、自車を中心としたアドホックネットワークを形成する技術が必要となる。そのためには、アドホックネットワーク内での、マルチホップ経路制御を実現することが必要となる。

## 2.2.1 想定アプリケーション

本項では、本研究におけるシステムの想定アプリケーションとしてグループコミュニケーションを示す。グループコミュニケーションシステムは、複数台の自動車におけるツーリング時などに用いられる。各車の搭乗者は、他車の搭乗者と、車載端末を用いてテキストメッセージ、車内音声、車内動画の交換を行うことでコミュニケーション

ンをとることができる。このアプリケーションは、ツーリング時などの仲間内のコミュニケーションのみではなく、交差点におけるドライバ同士のメッセージ交換や、後続車に対する右左折タイミングの告知に用いることも可能である。想定する自動車ネットワークの規模は、20 台程度である。

## 2.3 インターネットを用いた通信

自動車通信環境において、車載ノードの種類、あるいは、サービス毎に固有のシステムを構築するのは効率的でない。それらのシステムを自動車に搭載する際、車内の情報交換ネットワークは煩雑なものとなり、また、あらたにシステムを加える際のコストも高くなる。インターネットのような汎用的な通信環境、または、インターネットを使う汎用的なモデルを選択することで、自動車通信環境の効率化を図ることができる。

以下に、インターネットを用いて、自動車の通信環境を構築しているインターネット自動車プロジェクトについて述べる。

### 2.3.1 インターネット自動車プロジェクト

インターネット自動車プロジェクトは、移動するオブジェクトである自動車をインターネット上で取り扱うための技術開発、ならびにアプリケーションの開発を目標として、1996 年、WIDE プロジェクトが中心となり発足したプロジェクトである。インターネット自動車プロジェクトは、インターネットの視点から、自動車の情報化に関する技術開発と大規模実証実験を行っている。現在、ITS を中心とした、自動車の情報化の流れの中で、インターネット自動車プロジェクトの活動に注目が集まっている。

インターネット自動車プロジェクトでは、その通信モデルとして、自動車を「動くネットワーク」として扱っている。自動車は、各種の車載センサノード、車載端末、そして車載ルータなどからなるネットワークである。それらのノードの情報を外部のノードに対してサービスとして公開する際、インターネットの技術を用いることで、サービス毎にシステムを開発するのではなく、統一された通信環境を持つことができる。さらに車内ネットワークにおいて、各ノードの物理メディア特性に依存しないネットワーク環境を構築することが可能である。

インターネット自動車の通信モデルを、図 2.3 に示す。

インターネット自動車は、携帯電話や、衛星アンテナなどの複数の物理通信メディアを切り替えて通信を行う。そして、通信自体は IP により行われるために、車載ルータにおいてのみ、それらの物理メディアに対応していれば、車内ノードは車載ルータを介して、自動車外のノードと通信を行うことができる。

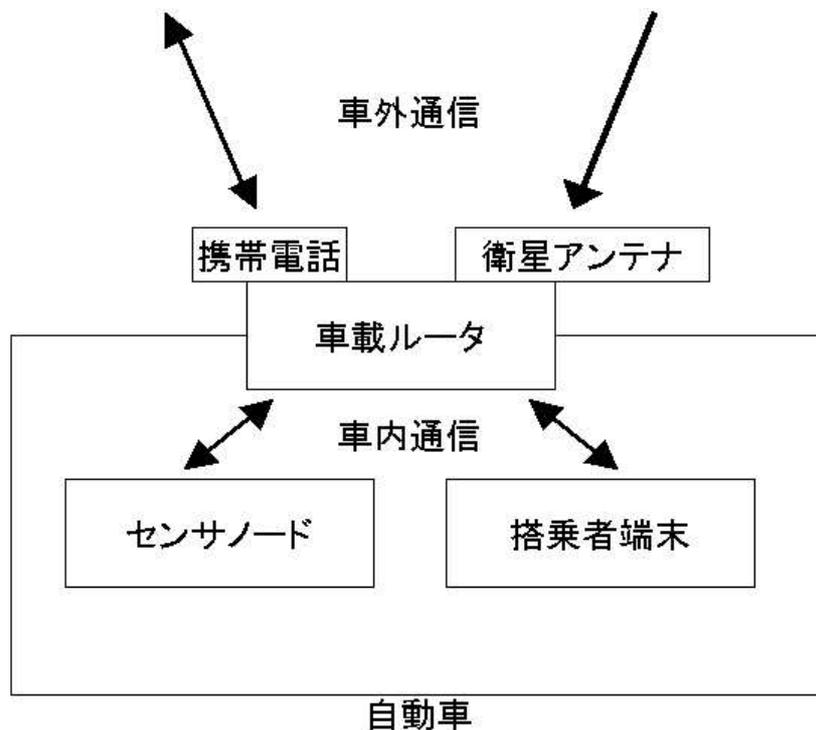


図 2.3: インターネット自動車の通信モデル

## 2.4 現在の車車間通信

現在、一般道で行われている自動車間でのコミュニケーションは、ドライバ同士の視覚的なシグナルの交換で行われている。パッシング、ウインカー、ハザード等、自動車に装備されているランプを点灯することで行われるものや、ドライバの挙手など、ドライバ自身の動作によるものである。それらの手段を用いたコミュニケーションは曖昧性を内包するため、時にドライバ同士の誤解を生み、結果として事故につながることもある。車車間通信技術を用いることで、曖昧性を排除した自動車間通信を実現し、自動車交通環境の最適化を図ることができる。

車車間通信に関する技術には、2つの方向性がある。すなわち、自動運転などのように、自動車の機械部で情報を交換することにより、道路交通の安全化をはかり、交通の効率化をはかるものと、自動車内を対象とし、搭乗者に情報、あるいはサービスを提供するものである。以下に、関連研究として、前者の例として CHAUFFEUR ならびに CHAUFFEUR II を示す。

## 2.4.1 CHAUFFEUR, CHAUFFEUR II

CHAUFFEUR プロジェクトは、商用車をターゲットとし、物流効率の改善、環境改善、安全性向上を目的とし、自動車の自動結合走行を実現している。自動結合走行とは、複数の自動車間でお互いに情報を交換することで、車群単位での自動走行を行うものである。プロジェクトは、Daimler Chrysler 社を中心とする、EU レベルでの研究開発である。1994年から1998年は、Telematics Application や Esprit (Information Technologies) をキーワードとした第4次フレームワークプログラムとして CHAUFFEUR、1998年から2002年には、IST (User-friendly information Society) をキーワードとした第5次フレームワークプログラムとして CHAUFFEUR II がある。

CHAUFFEUR プロジェクトにおいて、自動運転は2つの機能を用いて実現される。まず、先行車に赤外線ランプを装備し、後続車はその放出される赤外線マークを、赤外線感知 CCD カメラでとらえ、その画像処理をもとに自動追従を行う。さらに、お互いに車速、加速度等を 5.8GHz 帯を用いた車車間通信で交換することにより、制御応答性向上を図っている。これにより、先行車においてのみ有人運転をすることで、後続車では自動追従運転を実現することができる。

CHAUFFEUR II では、3つの車車間通信システムに関するモデルを提示している。すなわち、ドライバに対して、先行車との通信をもとに安全運転に対する情報を提供する CHUFFEUR Assistant、CHAUFFEUR プロジェクトにおいて実現された自動追従システムの発展系である Electric Tow Bar (電子自動追従運転)、そして、1台の先行車に2台以上の後続車が追従する CHAUFFEUR Platooning である。

## 2.5 これからの自動車通信環境

本章でこれまで行ってきた議論から、自動車通信環境において、情報化は自動車内のみで行われるのではなく、自動車外にも必要であるといえる。車車間通信においても、サービス毎にシステムを構築するのではなく、汎用的な通信環境を提供した上で、様々なアプリケーションを構築するモデルが効率的である。車車間、車外通信を問わず、汎用的な通信基盤としてインターネットを用いることで、アプリケーションの要求に対して柔軟に対応できる通信モデルを構築することが可能となる。しかし、現在のインターネット自動車プロジェクトにおける通信モデルでは、携帯電話等の比較的狭帯域かつ高遅延なメディアにたよらざるを得ない。その様子を、図 2.4 に示す。

これからの自動車通信環境において、特に車車間での通信に着目した際、以下のような要求を示すことができる。

- 汎用的な通信環境
- 広帯域、低遅延の通信

インターネットのような抽象化された通信モデルを用いることで、サービス毎にシステムを整えるような、煩雑な通信環境になることを避けることができる。また、イ

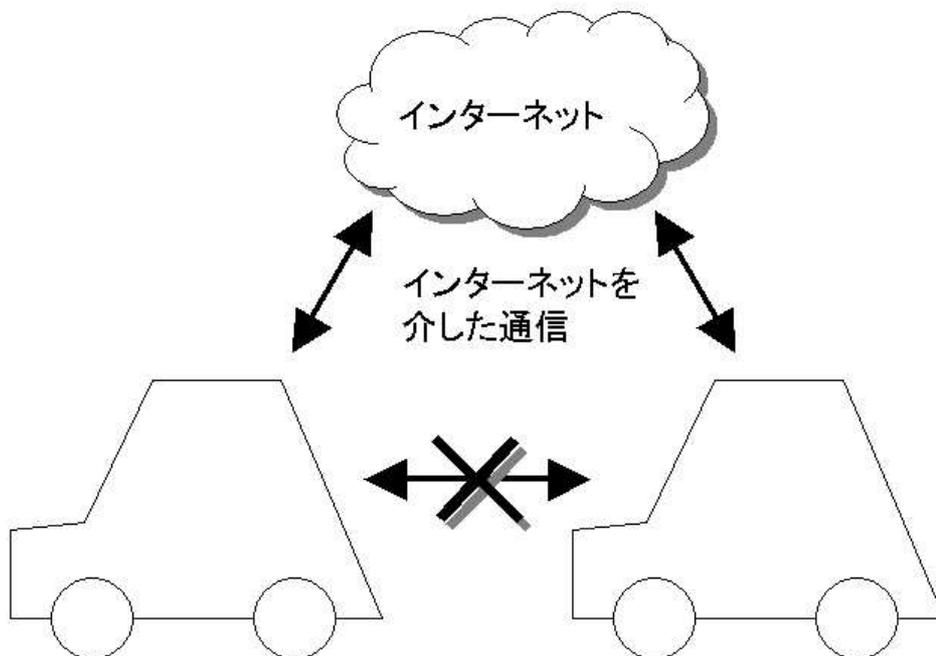


図 2.4: インターネット自動車のモデル

インターネットは広く一般的な通信媒体として位置付けられているために、車外ノードと通信を行う際にも、その接続は容易なものとなる。

車車間通信のような通信を行う際には、安全運転支援は言うに及ばず、想定アプリケーションの項で述べたようなグループコミュニケーションシステムや、位置情報共有システムなどのように時間的要求が高いものが多い。その際に、携帯電話等を用いて一旦外部のネットワークを経由してデータをやり取りするよりも、自動車に搭載された無線デバイスを用いて、自動車間で直接通信を行う方が効率的である。

現在提案されている自動車通信環境のモデルに対する考察を表 2.1 に示す。CHAUF-FEUR プロジェクトのモデルでは、即時性の高い通信を行うことができる。しかし、自動結合運転を目的とするため、そのシステムの汎用性は低い。現在のインターネット自動車プロジェクトの通信モデルは、通信基盤としてインターネットを採用しているために、通信の汎用性は高い。しかし、一方で携帯電話や衛星通信などの物理通信媒体を用いているために、即時性の高い通信は行うことができない。

本研究では、情報化が進む自動車環境において、特に車車間での通信に着目し、インターネット自動車における通信環境モデルを検証する。インターネットを用いた無線アドホックネットワークの形成技術として、Mobile Ad-hoc Network(MANET)がある。本研究では、インターネット自動車の車車間通信環境を実現するために、MANETを用いることの有用性を検討する。

	システムの汎用性	通信の即時性
CHUFFEUR	×	
インターネット自動車		×

表 2.1: 既存技術の比較

# 第3章 車車間通信における MANET(Mobile Ad-hoc Network)

本章では、インターネットにおいて、アドホックネットワークを形成する技術であるMANET(Mobile Ad-hoc Network)に関して、整理し、議論する。

## 3.1 車車間通信

本節では、車車間通信の状況を明確化することで、そこに求められる要件を明確化する。

### 3.1.1 本研究における車車間通信の形態

本論文が前提とする車車間通信の環境を以下にあげる。

- 同一車線を走行

車車間通信におけるネットワーク形成に関して、ある自動車に着目した際、同一車線を走行する自動車と形成するネットワークと、対向車線を走行する自動車と形成するネットワークでは、その性質が大きく変わる。同一車線の自動車と形成するネットワークの特徴として、トポロジ変化が頻繁でない、相対速度が比較的小さいという特徴を挙げることができる。それに対し、対向車線を走行する自動車と形成するネットワークの特徴として、トポロジ変化が非常に頻繁である、相対速度が大きいという、同一車線ネットワークとは全く反対の特徴を挙げることができる。

本論文では、目的を明確化するために、議論の対象を同一車線ネットワークのみに絞る。

- 無線到達範囲が数十～百数十メートルの無線デバイスを利用

現在様々な車車間無線通信の形態が提案されている中、ITS技術が使用する無線デバイスは、ミリ波、あるいはマイクロ波を用いたものが主流である。ミリ波、マイクロ波はともに、減衰しやすく、また、電波の再利用という観点から、ITS

に関わる無線デバイスの到達範囲は、数十～百数十メートルであるものが多い。本研究でも、想定デバイスとして、それらの無線デバイスを想定している。

### 3.1.2 インターネット自動車における車車間通信環境への要求

インターネット自動車において車車間通信を行う際の要求として、以下の項目を挙げることができる。

- IPv6 による通信
- 車内ネットワークのサポート

インターネット自動車では、ノードに移動透過性を保証する MIPv6[8]をはじめ、移動車内ネットワークを実現する Mobile subnet[9] や、通信状態によりメディアを切り替える I/F switch 等、基礎通信技術において IPv6[10] を用いた技術開発を行っている。本研究でも、IPv6 を用いた車車間通信環境を想定している。また、全世界の自動車台数は、7億台を超えている。これらの自動車ならびに、自動車内のノードにアドレスを振るには、IPv6 の広いアドレス空間が要求される。

また、第2章でも述べたように自動車は移動するネットワークとして抽象化される。自動車内には各種のノードが存在し、車外ノードと通信を行う。車車間通信においても、車載ノードは車載ルータを経由して他の自動車内のノードと通信を行う。そのために、車載ルータにおいて、車内ネットワークをサポートできる通信モデルが不可欠である。

## 3.2 MANET の概要

MANET(Mobile Ad-hoc Network) は、複数の移動ノードにより、マルチホップ無線ネットワークを形成するための技術である。互いに近距離に存在し、無作為に移動するノード同士で通信を行う際には、頻繁なトポロジ変化に対応できるネットワークが必要となる。MANET において、各ノードはルーティング機能を持ち、その無線デバイスの到達範囲内において、他ノードへパケットを中継する。ネットワーク内のすべてのノードがそのような中継を行うことで、目的のノードに対してパケットを送信することができる。

MANET のトポロジ概念を図 3.1 に示す。

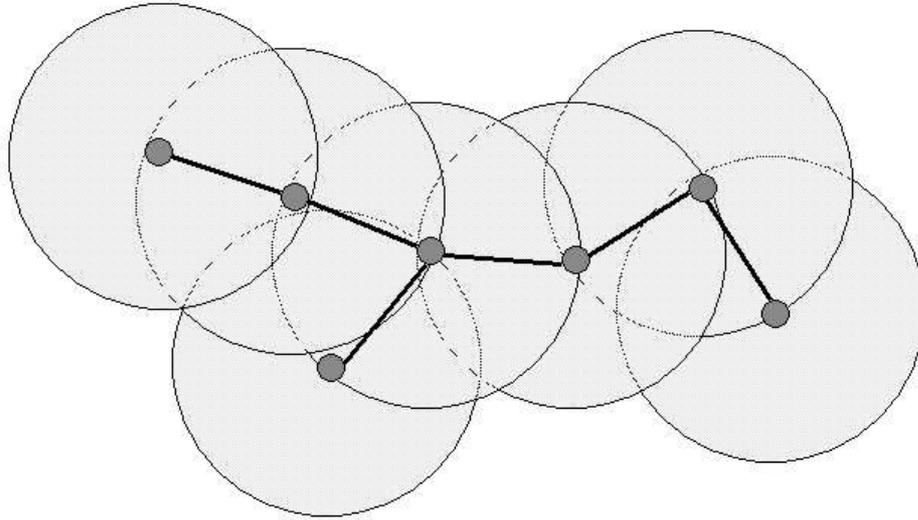


図 3.1: MANET トポロジ概念

MANET ルーティングプロトコルは、その経路の取得の方法からいくつかの種類に分類することができる。MANET ルーティングプロトコル分類の概略とその特徴を以下に示す。

- **Reactive 型**  
Reactive 型のルーティングプロトコルは、宛先への経路を On-demand で取得する。つまり、あるノードへの経路が必要になった際、ネットワークに対して経路要求をフラディングし、宛先への経路を保持しているノードが要求元に対して経路応答を返す。よって Reactive 型のルーティングプロトコルにおいて、定期的な制御オーバーヘッドがネットワークに対してかかることはない。代表的なルーティングプロトコルとして、DSR[11]、AODV[12] をあげられる。
- **Proactive 型**  
Proactive 型のルーティングプロトコルは、あらかじめ宛先ノードへの経路情報を保持する。各ノード間で、定期的に経路情報を交換することにより、自身の経路表に各ノードへの経路を構築する。各ルーティングプロトコルは、定期的な制御オーバーヘッドを軽減するための工夫をしている。代表的なルーティングプロトコルとして、OLSR[13]、TBRPF があげられる。

- Hybrid 型

Hybrid 型のルーティングプロトコルは、Reactive 型、Proactive 型の両方のルーティングプロトコルの性質をあわせ持ち、それらの性質を状況に応じて使い分けることで、オーバーヘッドの最適化を図っている。代表的なルーティングプロトコルとして、性質を空間的に、つまり、ネットワーク内におけるノードの遠近によって使い分ける ZRP (Zone Routing Protocol)[14] がある。

以上に述べた分類の他にも、経路を階層的に持つものや、位置情報に基づいてルーティングオーバーヘッドを軽減するものが提案されている。

本研究では、インターネット自動車間の車車間通信におけるアドホックネットワークの形成技術として、MANET の技術を用いる。

### 3.3 各プロトコルの比較

本節では、IETF 内、Manet WG で議論されているルーティングプロトコルのうち、代表的な 4 つのルーティングプロトコルについて比較検討を行う。Reactive 型では、DSR と AODV、Proactive 型では OLSR と TBRPF である。以下にそれぞれのルーティングプロトコルの特徴を挙げる。

#### 3.3.1 DSR (Dynamic Source Routing)

DSR は、Reactive 型のルーティングプロトコルである。DSR の大きな特徴は、パケットのフォワードをソースルーティングを用いて行うことにある。データパケットの転送にソースルーティングを用いることで、中間ノードによる経路情報の保持を避け、また、フォワード時におけるパケットのループを防ぐことができる。

#### 3.3.2 AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)

AODV は、Reactive 型のルーティングプロトコルである。AODV は、ディスタンスベクターの経路アルゴリズムを採用する。各ディスティネーションへの経路情報に関して、それぞれにシーケンス番号を割り当てる。それに基づき、同一宛先ホストに対する経路を複数保持していた場合、シーケンス番号がもっとも大きな経路を選択する。結果として、最新の経路を選択、広告し、パケット転送時のループを防ぐことが可能となる。

#### 3.3.3 OLSR (Optimized Link State Routing)

OLSR は、Proactive 型のルーティングプロトコルである。OLSR は、制御パケットをブロードキャストする際に、そのオーバーヘッドを軽減するために、制御パケット

を転送するノードを multipoint relay(MPR) ノードとして指定する。それにより、ネットワーク全体の制御パケットによるオーバーヘッドを軽減する。また、片方向リンクによるデータパケット転送の不整合を防ぐ。

### 3.3.4 TBRPF(Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding)

TBRPF は、Proactive なルーティングプロトコルである。TBRPF では、定期的な経路情報の交換をもとに、それぞれのノードで Dijkstra アルゴリズムに基づいた最適経路探索が行われる。TBRPF では、指定された時間が来るまでは、それぞれのノードはその期間中の自身の経路情報の変化のみをネットワークにブロードキャストする。また、TBRPF はネットワークプレフィクスによる通信もサポートしている。

## 3.4 車車間通信で用いる MANET ルーティングプロトコルの選択

本節では、以下に前説で述べた 4 つのルーティングプロトコルを、インターネット自動車における車車間通信環境の要求から比較、検討を行う。これまでに述べた要求、前提を整理すると、インターネット自動車による車車間通信を MANET を用いて実現する際、各 MANET ルーティングへの要求は以下の通りである。

- 即時的なデータパケット転送が可能であること
- ネットワークプレフィクスベースでの通信をサポートすること
- 急激なトポロジ変化を前提としないこと

2.5 節で述べたとおり、車車間通信におけるサービスは時間的要求が高い。また、これまでも述べてきたとおり、自動車は移動するネットワークであり、各車載ノードは特定のネットワークプレフィクスによる IP アドレスが割り当てられたモデルをインターネット自動車プロジェクトでは採用している。3.1.1 項で述べた通り、本研究では、同一車線を走行する自動車群で構成される車車間ネットワークを想定しており、必ずしも急激なトポロジ変化に対する耐性が高い必要はない。

以上の要求、条件をもとに、3.3 節で述べた各 MANET ルーティングプロトコルについて比較検討を行う。まず、サービスの時間的要求が高いことから、パケットフォワード時に経路検索の時間的オーバーヘッドがかかる Reactive 型ルーティングプロトコルより、あらかじめ宛先ノードに対する経路を取得する Proactive 型のルーティングプロトコルの方が望ましい。本研究では、反対車線を走行する自動車を含むネットワークは想定しないため、あらかじめ取得した経路情報が、パケット転送時に不正となる可能性は低い。

	DSR	AODV	OLSR	TBRPF
Type	Reactive	Reactive	Proactive	Proactive
Network Prefix Support	×	×	×	

表 3.1: MANET ルーティングプロトコルの比較

3.3 で述べた 4 つのルーティングプロトコルに関する比較を表 3.1 に示す。

以上の検討から、本研究では、Proactive 型のルーティングプロトコルであり、ネットワークプレフィクススペースでのルーティングをサポートしている TBRPF を、インターネット自動車間のアドホックネットワーク形成機構として用いる。

## 第4章 TBRPF の設計と実装

本章では、ドラフト中で定義される TBRPF の設計と本研究における TBRPF の実装について述べる。

### 4.1 実装概要

本節では、実装概要として、実装要求と、実装環境を述べる。

#### 4.1.1 実装要求

以下に、本実装における実装要求を示す。

- IPv6 による実装
- ユーザーランドに実装

本実装は、インターネット自動車間における車車間通信の検証に用いるものである。そして、現在のインターネット自動車における通信は IPv6 を用いて行われている。よって、本実装では、IPv6 による実装を行う。ユーザーランドに実装することにより、複数の OS に対応した実装を実現することができる。本実装では、BSD 系の OS を前提とした実装を行った。

#### 4.1.2 実装環境

表 4.1 に、本実装に用いた環境を示す。

OS	NetBSD-1.6-release
IPv6 patch	kame-20021021-netbsd16-snap
使用言語	C 言語
コンパイラ	gcc-2.95.3

表 4.1: 実装環境

また、本実装では、draft-ietf-manet-tbrpf-06 に基づいて実装を行った。

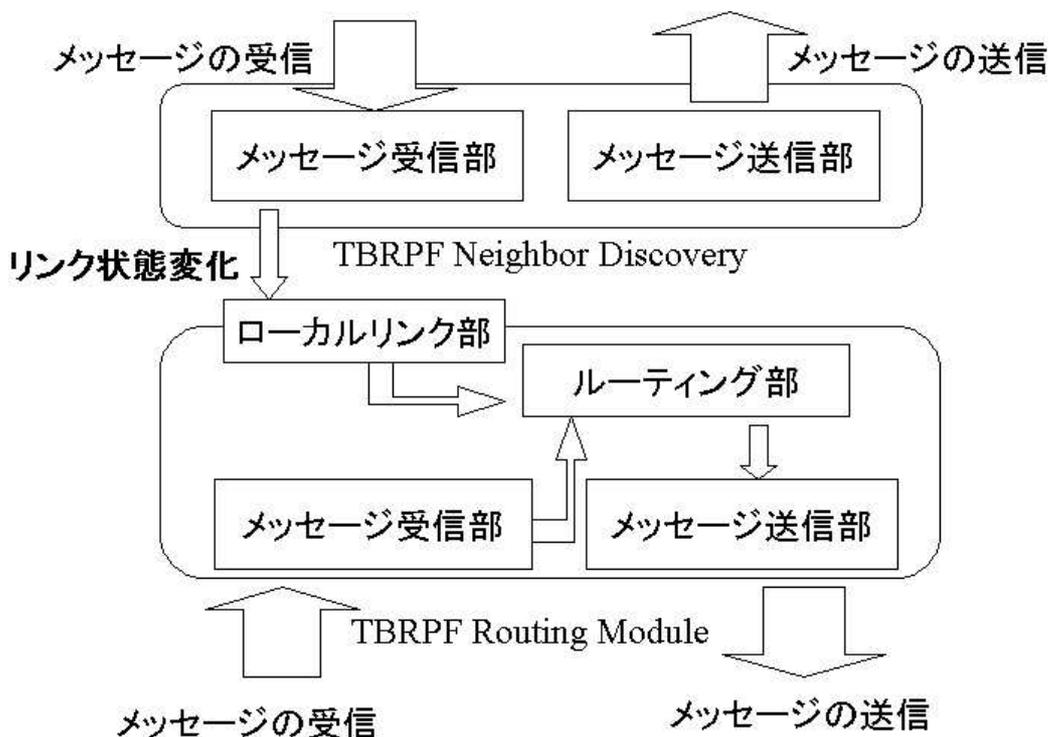


図 4.1: モジュール相関図

## 4.2 モジュール設計

本節では、TBRPF を構成する 2 つのモジュールについて説明する。TBRPF は大きく分けて以下の 2 つのモジュールで構成される。

- TBRPF Neighbor Discovery
- TBRPF Routing Module

TBRPF Neighbor Discovery(TND) は、隣接ノードの状態を管理し、TBRPF Routing Module に隣接ノードのリンク状態情報を通知する。TBRPF Routing Module は、TND から得た情報をもとに、他ノードと、リンク情報を交換し、ネットワーク全体のルーティングツリーを構成する。図 4.1 に、各モジュールの相関図を示す。

また、本実装でメッセージの交換を行う際に用いた、マルチキャストアドレスとポート番号を表 4.2 に示す。

Multicast Address	ff02::1e
Port	10309/udp

表 4.2: 使用アドレス/ポート

### 4.3 TBRPF Neighbor Discovery

TBRPF Neighbor Discovery(TND) は、1hop に存在する隣接ノードを管理するためのモジュールである。図 4.2に、Neighbor Table の構造を示す。

```

struct nbr_tbl {
    u_long          nbr_rid; /* neighbor router id */
    u_long          nbr_count; /* message hold count */
    struct in6_addr nbr_if_addr; /* neighbor interface address */
    u_char          nbr_level; /* neighbor link status */
    u_char          nbr_hseq; /* latest hseq */
    u_char          tif_metric;
    u_char          nbr_metric; /* neighbor metric */
    u_char          nbr_pri; /* neighbor priority */
    u_char          hello_history[HELLO_ACQUIRE_WINDOW];

    struct timeval  nbr_life; /* neighbor lifetime */
    struct tbrpf_if *nbr_if; /* interface hearing neighbor */
};

```

図 4.2: Neighbor Table の構成

#### 4.3.1 メッセージ送信部

TND は、隣接ノード情報の差分のみを HELLO パケットとして送信する。これにより、ネットワークにかかる負荷を軽減する。HELLO メッセージは、HELLO\_INTERVAL で定義された間隔で、送信される。HELLO メッセージのパケットフォーマットを図 4.3 に示す。

HELLO メッセージには、以下の 3 つのタイプのメッセージがある。

- NEIGHBOR REQUEST
- NEIGHBOR REPLY

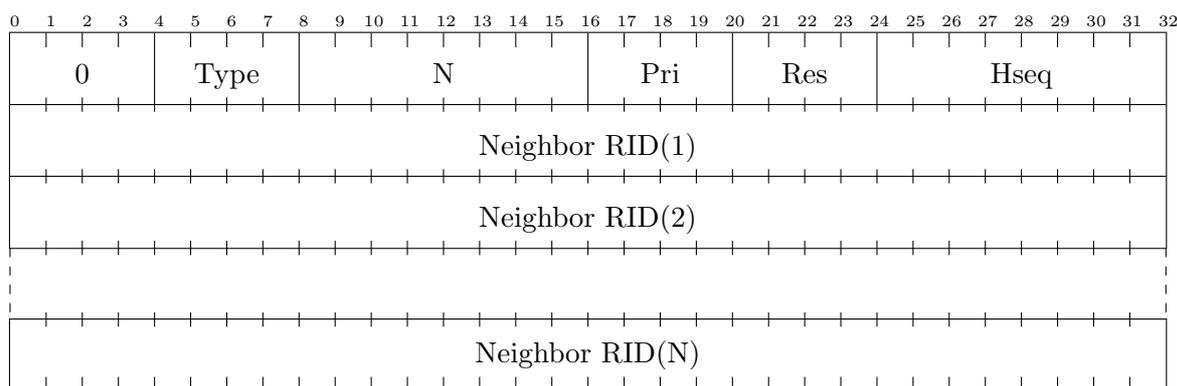


図 4.3: HELLO パケットフォーマット

- NEIGHBOR LOST

以下に送信メッセージの生成処理を述べる。nbr\_count は送信すべきメッセージの残数である。nbr\_level には、その隣接とのリンク状態が代入される。値は、双方向にメッセージの交換が行われた際には、TWO\_WAY、メッセージを受け取ったが、隣接ノードがそれを認識していない場合には ONE\_WAY、メッセージの交換が行われていない際には、LOST が代入される。それぞれのメッセージには、nbr\_count が 0 より大きなノードのルータ ID が挿入される。nbr\_count は、該当するメッセージが送られるたびに 1 ずつ減少される。

- NEIGHBOR REQUEST メッセージには、nbr\_level が ONE\_WAY となったノードのルータ ID が付加される。NEIGHBOR REQUEST メッセージは、例え送信すべきルータ ID のリストが空であっても送信される。
- NEIGHBOR REPLY メッセージは、状態が TWO\_WAY となったノードのルータ ID が付加される
- NEIGHBOR LOST メッセージには、状態が LOST となったルータ ID が付加される

NEIGHBOR REPLY、NEIGHBOR LOST の両メッセージは、状態が変化したノードのルータ ID があつた場合のみ送信される。

隣接ノードからのメッセージにより、Neighbor Table 上のノードの状態が変化すると、nbr\_count が、正数の NBR\_HOLD\_COUNT に設定される。これにより、状態変化のあつたノード状態をネットワークにブロードキャストすることになる。

### 4.3.2 メッセージ受信部

以下には、メッセージの受信処理の流れを示す。

1. ノードは、隣接ノードから受け取る HELLO メッセージのシーケンス番号を `hello_history` に管理し、最新のシーケンス番号を `nbr_hseq` に保持する。ノードは、隣接ノードから HELLO\_ACQUIRE\_COUNT で定義された数の HELLO メッセージを受け取るまで隣接ノードの `nbr_level` を LOST に、`nbr_count` は 0 に設定し、ネットワークにその隣接ノード状態を広告することはない。これは、短期に隣接から外れてしまうノードへの情報をもつオーバーヘッドを避けるためである
2. 受けとったメッセージの番号と、`nbr_hseq` を比較し、両者が NBR\_HOLD\_COUNT 以上の隔たりを持つ際は、メッセージ送信元ホストの `nbr_level` を LOST とし、`nbr_count` を NBR\_HOLD\_COUNT とする (次のメッセージ送信時に、NEIGHBOR\_LOST が送信される)
3. 受け取った NEIGHBOR REQUEST に自身のルータ ID が含まれている場合、送信元ノードの `nbr_level` を TWO\_WAY とした上で、ノードのルータ ID を含めた NEIGHBOR REPLY メッセージを隣接ネットワークに送信する。TND は、リンクアップ情報を TBRPF Routing Module に対して通知する
4. 自身のルータ ID が、NEIGHBOR REPLY メッセージに含まれていることを検知したノードは、メッセージの送信元ノードの `nbr_level` を TWO\_WAY にし、TBRPF Routing Module に対して、隣接ノード間とのリンクのアップ情報を通知する
5. 自身のルータ ID が、NEIGHBOR\_LOST メッセージに含まれていることを検知したら、送信元ノードの `nbr_level` を LOST にし、リンクダウン情報を TBRPF Routing Module に通知する

## 4.4 TBRPF Routing Module

TBRPF Routing Module は、大きくメッセージ部、ルーティング部、ローカルリンク部に分けることができる。TBRPF Routing Module は、ローカルリンク部をインターフェースとして、TND から隣接ノードに関するリンク情報を得る。TBRPF Routing Module は、それらの情報と、メッセージ部から得た他ノードのリンク状態をもとに、ルーティング部でネットワークのトポロジグラフを生成し、カーネル内のルーティングテーブルに経路情報を挿入する。

図 4.4 に、保持するノード情報の構成と、リンク情報の構成を示す。

### 4.4.1 ローカルリンク部

ローカルリンク部は、TND と TBRPF Routing Module のインターフェースとなる部分である。TND は、ローカルリンク部で定義された関数を用いることで、モジュール間での、リンク情報の交換を可能としている。ローカルリンク部は、以下の関数からなる。

```

#define LEAF          0
#define INTERMEDIATE 1

struct tbrpf_rt_tbl {
    u_long  rid; /* node's router ID */
    u_char  node_type; /* leaf or intermidiate node */
    u_long  rt_dist; /* hop metric */

    struct tbrpf_rt_tbl *p; /* next hop node (parent) */
    struct tbrpf_rt_tbl *old_p; /* node's old parent */
    struct tbrpf_rt_tbl *pred; /* one hop upper node in T */
    struct tbrpf_rt_tbl *r[MAXR]; /* node-set reporting this */

    struct nbr_tbl *n; /* for 1 hop neighbor node*/
};

struct tbrpf_link {
    u_char  reported; /* is in Topology Graph? */
    double  cost; /* link metric */

    time_t  nr_expire;
    time_t  rt_expire;
    time_t  tg_expire;

    struct tbrpf_rt_tbl *upper; /* node in upper */
    struct tbrpf_rt_tbl *down; /* node in downer */

    struct tbrpf_rt_tbl *r[MAXR]; /* node reporting link */
};

struct tbrpf_old_link {
    u_long  upper_rid;
    u_long  down_rid;
};

```

図 4.4: ノード情報/リンク情報

- tbrpf\_link\_up()  
TND からのリンクアップ情報を取得する
- tbrpf\_link\_down()  
TND からのリンクダウン情報を取得する
- tbrpf\_link\_change()  
TND からのリンク変化情報を取得する

#### 4.4.2 メッセージ部

TBRPF Routing Module は、他ノードと以下のメッセージを交換する。

##### アップデートメッセージ

アップデートメッセージは、ルータ ID ベースでの経路を交換するためのメッセージである。図 4.5 に、アップデートメッセージのメッセージフォーマットを示す。

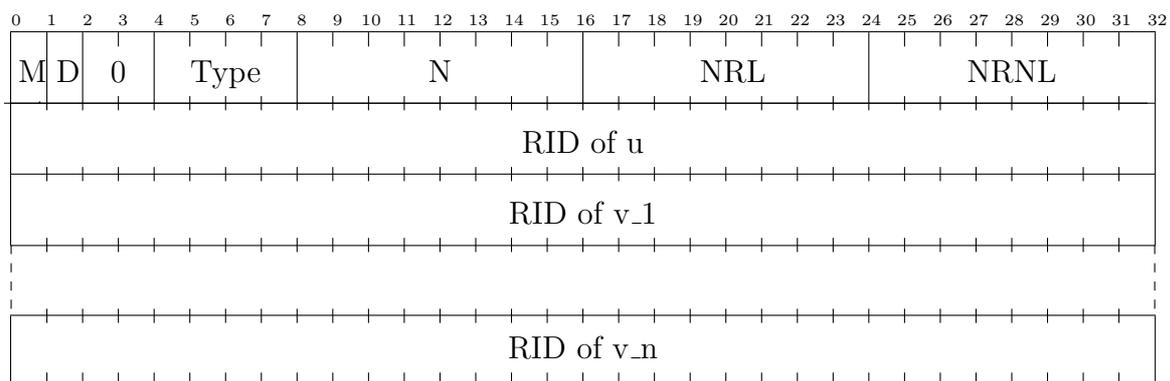


図 4.5: アップデートメッセージフォーマット

アップデートメッセージには、以下の種類がある。

- フルアップデートメッセージ  
自ノードが持っている、あるノードを始点とするリンク情報全てを含んだメッセージ
- 追加アップデートメッセージ  
期間中に自ノードトポロジグラフに加わった、あるノードを始点とするリンク情報のみを含んだメッセージ
- 削除アップデートメッセージ  
期間中に自ノードのトポロジグラフから消えた、あるノードを始点とする経路のみを含んだメッセージ

```

struct tbrpf_if_tbl {
    struct in6_addr if_addr;
    u_long   if_rid;
    time_t   if_expire;
};

struct tbrpf_host_tbl {
    struct in6_addr h_addr;
    u_long   h_rid;
    time_t   h_expire;
};

struct tbrpf_network_tbl {
    struct in6_addr net_prefix;
    u_char   net_length;
    u_long   net_rid;
    time_t   net_expire;
};

```

図 4.6: アソシエーションテーブル

## アドレスアソシエーションメッセージ

アソシエーションメッセージは、広告されたルータ ID と IP アドレスを対応付けるためのメッセージである。図 4.7 にアドレスアソシエーションメッセージのフォーマットを示す。図中の、Prefix Len フィールドは、ネットワークプレフィクスアソシエーションメッセージにおいてのみ用いられる。また、TBRPF のドラフト中では、IPv4 による通信が前提とされている。本実装では、IPv6 による通信を行うために、アドレスフィールドを IPv4 アドレスのサイズである 32 ビットから、IPv6 のアドレスを格納できるサイズである 128 ビットに拡張した。

アソシエーションメッセージは、処理するアドレスの種類により、インターフェースアソシエーション、ホストアソシエーション、ネットワークアソシエーションに分類され、各メッセージによる処理データ構造はそれぞれ、interface\_tbl, host\_tbl, network\_tbl である。それぞれのデータ構造の定義を図 4.6 に示す。

メッセージフィールド中の ST により各アソシエーションメッセージの種類 (FULL /ADD /DELETE) を指定する。

- インターフェースアソシエーションメッセージ  
ルータ ID と、インターフェースアドレスを対応付けるためのメッセージ

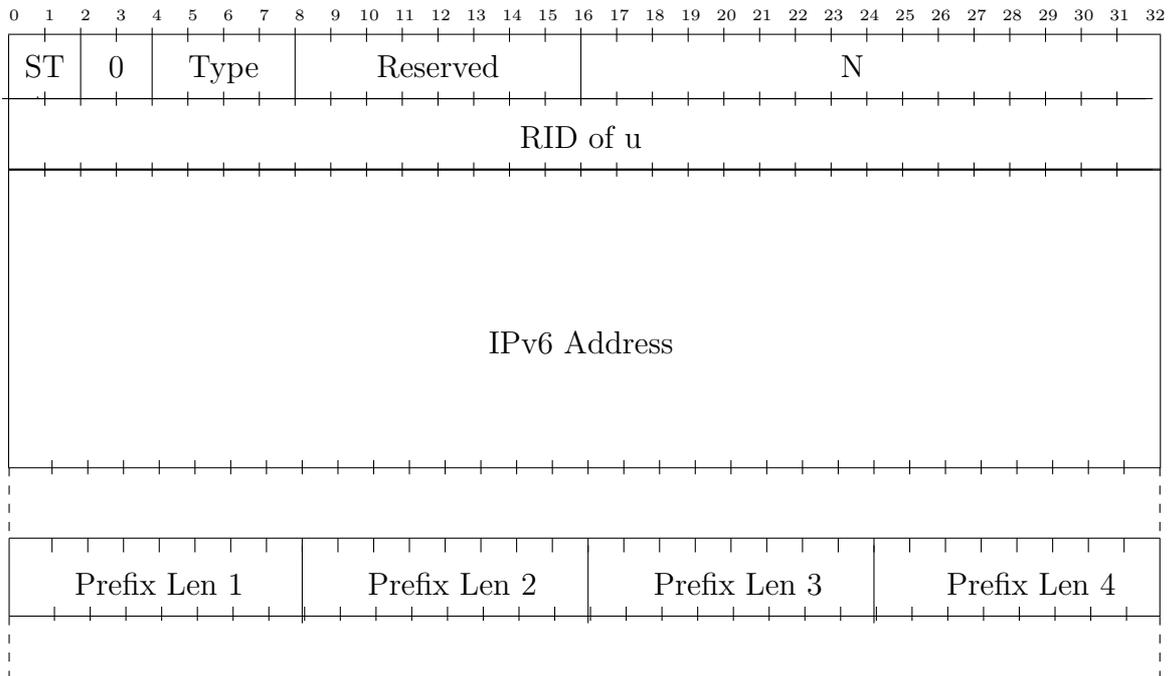


図 4.7: アソシエーションメッセージフォーマット

- ホストアソシエーションメッセージ  
ルータ ID と、ホストアドレスを対応付けるためのメッセージ
- ネットワークプレフィクスアソシエーションメッセージ  
ルータ ID と、ホストが広告するネットワークプレフィクスを対応付けるためのメッセージ

## メッセージ送信

TBRPF では、Reportable Nodeset(RN) と呼ばれるノードセットを定義することにより、送信経路数の最適化を図り、結果として、オーバーヘッドの軽減を図っている。RN を選択する計算は、まず、全ての隣接ノードにおいて、各ノードを始点とする 2 ホップの最短経路木を構成することから始まる。その最短経路木において、自ノードが、中継点となる宛先ノードを RN に加える。さらに、自ノードのソースツリー内において、RN 内にすでに存在するノードから先の木のみを RN に加えていく。そうすることで、自ノードの最短経路木のなかから、隣接ノードが望む情報のみを抽出することが可能となり、結果、メッセージのオーバーヘッドを軽減することができる。

また、メッセージの送信は、複数のメッセージを 1 つのパケットに統合し、MIN\_UPDATE\_INTERVAL 秒ごとに送信される。送信バッファの確保は `tbrpf_update_all()` 関数によって行われ、それぞれのメッセージを作成するための関数が順次、呼び出される。

メッセージを作成する関数を以下にあげる。

- `tbrpf_generate_periodic_update()`  
PER\_UPDATE\_INTERVAL 秒毎の、周期アップデートメッセージ作成
- `tbrpf_generate_differential_update()`  
MIN\_UPDATE\_INTERVAL 秒ごとの、周期アップデート以外のメッセージ作成
- `tbrpf_generate_association_messages()`  
各アソシエーションメッセージの作成

以下に、メッセージの種類ごとに送信処理を述べる。

- アップデートメッセージ作成

メッセージの送信は、2つの形態からなる。すなわち、ノードが持つ全てのリンク情報を広告する周期経路広告と、期間中に起きたリンク状態の変化のみを広告する差分経路広告である。メッセージの送信は、MIN\_UPDATE\_INTERVAL 秒毎に行われる。ノードが最後に周期経路広告を行ってから、PER\_UPDATE\_INTERVAL 秒たっていない場合は、差分経路広告が行われる。

周期経路広告は、フルアップデートメッセージを送信することで行われる。周期経路広告時のフルアップデートメッセージには、RN 内に存在し、かつ、ノードテーブル TT において `node_type` が LEAF でないノードについて処理される。図 4.5 中の `u` に、処理対象ノードを挿入し、`v_1` から `v_n` にリンクの下流ノードが挿入される。

差分経路広告は、差分経路のみを送信する。`old_RN` として保持されたノード群と RN 内のノード群を比較する。`old_RN` は、`struct tbrpf_rt_tbl` 型の構造体配列である。新しく RN に加わったノードで、かつ `node_type` が LEAF でないノードの情報は、フルアップデートメッセージによって送信される。RN に存在するノードに新しくリンクが加わった際には、追加アップデートメッセージが送信される。削除リンクに関する情報は、削除アップデートメッセージを送信することで行われる。

- アソシエーションメッセージ作成

アソシエーションメッセージは、周期アソシエーション広告と、差分アソシエーション広告によって行われる。アソシエーションメッセージは、MIN\_UPDATE\_MESSAGE 秒毎に行われる。最後に周期アソシエーション広告を送信してから、各アソシエーションメッセージの周期がまだ到達していない場合、差分アソシエーション広告が行われる。

周期アソシエーション広告では、各アソシエーションテーブル上に存在する全てのルータ ID とアドレスの組み合わせを広告する。差分アソシエーションでは、各アソシエーションテーブル上の変化のみを広告する。変化がない際には、アソシエーションメッセージは送信されない。

## メッセージ受信

メッセージ部は、ルーティング部が必要とする経路情報を `struct tbrpf_link` 型構造体配列 `TG` に格納する。メッセージ部は、メッセージを受信すると、メッセージ中のノード `u` がノードテーブル `TT` 内に存在しない場合は、エントリを作成する。さらに、経路情報の送信元隣接ノードを各ノード情報の `r` メンバに格納する。

以下に、メッセージ受信の流れを示す。

1. メッセージの受信は、汎用的メッセージ処理ルーティンである `tbrpf_process_messages()` によって行われる。`tbrpf_process_messages()` は、受け取ったメッセージサイズが 0 以上であるとき、対応するメッセージの処理ルーティンを呼び出す
2. 受け取ったメッセージタイプが、アップデートメッセージであるとき、`tbrpf_process_update_messages()` が呼び出される。4.5 中の `u` が、ノードテーブル `TT` に存在しない場合、`TT` に新しくエントリを作成し、メッセージタイプにしたがって、エントリに対する処理を行う。さらに、経路情報の送信元隣接ノードを各ノード情報の `r` メンバに格納する。`tbrpf_process_update_messages()` は、処理中のメッセージタイプがアップデートメッセージでなくなると、`tbrpf_process_messages()` に処理を返す
3. 受け取ったメッセージタイプが、アソシエーションメッセージであるとき、`tbrpf_process_association_messages()` が呼び出される。メッセージタイプにしたがって、対応するデータ構造を書き換える (`interface_tbl`, `host_tbl`, `network_tbl`)。データ構造の書き換えは、図 4.7 中の `u` をもとに行われ、`ST(FULL/ADD/DELETE)` によって、ルータ ID ベースでの、データ構造の全書き換え/追加/削除が行われる。処理中のメッセージタイプが、アソシエーションメッセージでなくなると、`tbrpf_process_messages()` に処理を返す

### 4.4.3 ルーティング部

ルーティング部は、保持するリンク情報をもとに、ネットワーク内のトポロジグラフを生成し、さらに、自身の経路表を書き換える。以下に、ルーティング部を詳説する。

#### 最適経路計算

最適経路計算は、`tbrpf_update_souce_tree()` 関数を呼び出すことで行われる。全てのリンク情報を保持する `TG` と、最短経路計算に基づくリンク情報テーブルである `T` を分割することにより、メッセージ部が他ノードに送信するメッセージの最適化を図ることができる。`T`、`TG` ともに `struct tbrpf_link` 型の配列である。

SPF 計算を行う際のアルゴリズムには、`dijkstra` 最短経路計算アルゴリズムを用いた。経路計算を行う際には、単純に最短経路を選択するのではなく、最適な経路を計算

するために、各リンクの比較時において、2つのコストペナルティ処理が行われる。TG内に存在し、かつT内に存在しないリンクに対しては、NON\_REPORT\_PENALTYが加算される。これは、リンクのreported エントリを参照することで行われる。また、リンクの上流ノードに関する情報を、上流ノードへの経路のネクストホップノードが報告していない際にも、NON\_REPORT\_PENALTYが加算される。次に、以前のトポロジテーブルとして格納しているリンク情報構造である old\_T 内に存在しないリンクには、NON\_TREE\_PENALTY が加算される。これらの処理は、より安定した経路を選択するために行われる。

## 経路表変更

経路表の書き換えは、`tbrpf_update_routing_table()` を呼び出すことで行われる。本実装は、経路表の書き換えを行うために経路制御ソケットを用いて行う。経路制御ソケットは、`socket()` システムコールをインターフェースとし、ユーザランドからカーネル内の経路情報の読み出し、書き込みを行う。

経路の挿入は、以下の手順で行われる。

1. 最短経路木内の全てのノードにおいて、宛先をルータ ID から生成した仮のアドレスとし、宛先への最短経路木内のネクストホップとした経路エントリを作成
2. 経路表内に該当する仮アドレスが存在するノードは、各アドレステーブルから宛先を実アドレス、ネクストホップを最短経路木内のネクストホップとした経路エントリを作成

仮アドレスは、下位 32 ビットをルータ ID でマスクしたリンクローカルアドレスとする。

経路表の例を図 4.8 に示す。

この経路表は、ルータ ID10308 のノードのものである。このノードは自身のリンクローカルアドレスを default ルータとして指定している。そして、グローバルアドレス `3ffe:1::1` を保持している。ルータ ID10309 のノードを隣接ノードとして検知しているために、`fe80::2845` の経路エントリを作成し、そのエントリのネクストゲートウェイを、隣接インターフェース (`fe80::240:96ff:fe2a:4d1e`) としている。このインターフェースについているグローバルアドレスは、`3ffe:2::1` である。ルータ ID10309 のノードは、もう 1 つインターフェース (`3ffe:3::1`) を保持しており、そのインターフェースを経由して、ルータ ID10307 のノードが接続している。`fe80::2843` のエントリがルータ ID10307 のノードのものであり、そのネクストゲートウェイはルータ ID10309 のリンクローカルアドレスである。また、ルータ ID10307 のノードは、`3ffe:4::1` のアドレスを保持している。

```

default                                fe80::200:e8ff:fe3c:5b9c          UGS
      1 63754      - lo0

3ffe:1::1                              00:00:e8:3c:5b:9c              UHL
      0 0          - lo0
3ffe:2::1                              fe80::240:96ff:fe2a:4d1e%tlp0   UGH
      0 0          - tlp0
3ffe:3::1                              fe80::240:96ff:fe2a:4d1e%tlp0   UGH
      0 0          - tlp0
3ffe:4::1                              fe80::240:96ff:fe2a:4d1e%tlp0   UGH
      0 0          - tlp0
fe80::/10                              ::1                              UGRS
      24 0        - lo0
fe80::2843                             fe80::240:96ff:fe2a:4d1e%tlp0   UGH
      0 0          - tlp0
fe80::2845                             fe80::240:96ff:fe2a:4d1e%tlp0   UGH
      0 0          - tlp0
fe80::%tlp0/64                         link#1                           UC
      0 0          - tlp0
fe80::200:e8ff:fe3c:5b9c%tlp0         00:00:e8:3c:5b:9c              UHL
      0 0          - lo0
fe80::240:96ff:fe2a:4d1e%tlp0         00:40:96:2a:4d:1e              UHLS
      5 16642     - tlp0
fe80::%lo0/64                          fe80::1%lo0                    U
      0 0          - lo0
fe80::1%lo0                            link#2                           UHL
      0 0          - lo0
fec0::/10                              ::1                              UGRS
      0 0          - lo0
ff01:1::/32                            link#1                           UC
      0 0          - tlp0
ff01:2::/32                            ::1                              UC
      0 0          - lo0
ff02::%tlp0/32                         link#1                           UC
      0 0          - tlp0
ff02::%lo0/32                          ::1                              UC
      0 0          - lo0

```

図 4.8: 経路表の例  
29

## 第5章 評価実験

本章では、MANET を用いた車車間マルチホップ通信環境の評価実験を行う。

### 5.1 実験概要

本章では、以下の2つの実験を通して、車車間通信環境の評価を行う。

- TBRPF 実装の動作検証
- 車車間マルチホップ通信環境の評価

それぞれを以下に詳述する。

### 5.2 実装動作実験

本節では、本研究で実装した TBRPF の動作実験について述べる。この実験は、固定の実験ネットワーク上で TBRPF 実装の性能測定を行った。

#### 5.2.1 実験環境

実験環境を、表 5.2.1 に示す。

RID	CPU	Memory	OS
10307	MMX Pentium 300MHz	64M	NetBSD-1.6-release
10308	PentiumIII 500MHz	256M	NetBSD-1.6-release
10309	Celeron 300MHz	64M	FreeBSD-4.6.2-release

表 5.1: 動作実験環境

実験ネットワークトポロジを図 5.1 に示す。

また、それぞれのルータ ID、インターフェース、IPv6 アドレスの対応表を表 5.2.1 に示す。

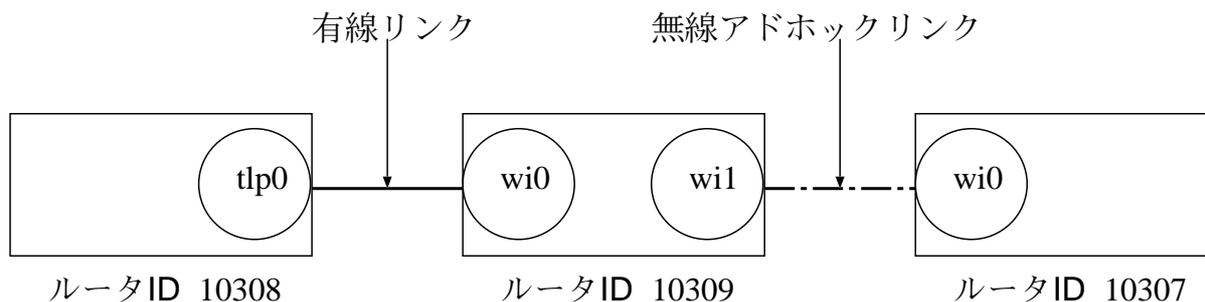


図 5.1: 実験トポロジ

Router ID	IPv6 Address
10308(tlp0)	3ffe:1::1
10309(wi0)	3ffe:2::1
10309(wi1)	3ffe:3::1
10307(wi0)	3ffe:4::1

表 5.2: アドレス/インターフェース対応表

## 5.2.2 実験

実験では、ping6 を用いることで、収束速度、ならびに RTT を測定した。収束時間は、ping6 における到達性が失われてから、回復するまでの時間とする。また、ping6 による ICMP メッセージの送信は 100 ms 毎に行った。

実験中は、ルータ ID10308 のノードから、ルータ ID10307 のノードに対して ICMP echo request メッセージを送信した。実験中に、ルータ ID10307 のノードにおいて、無線インターフェースをダウンさせ、5 秒待機し、もう 1 度無線インターフェースをアップさせることで、トポロジ変化を起こした。その際、インターフェースのアップ/ダウン情報を取得する機能はルーティングデーモンにおいて抑制してある。これは、実際の MANET 環境によるトポロジ変化を模倣するためである。実験で計測した収束速度と RTT の測定結果を図 5.2 に示す。

計測開始から 6.8 秒目において、ルータ ID10307 のノードで無線インターフェースをダウンさせたために接続性が失われた。これから 5 秒後に、該当する無線インターフェースをアップさせた。ルータ ID10308 のノードにおいて、計測開始から 15.6 秒目にルータ ID10307 のノードへの到達性は回復している。つまり到達性が失われていた時間は、合計 8.8 秒となる。このうち、5 秒は、ルータ ID10307 のノードにおいて、無線インターフェースをダウンしてからアップするまでの待機時間であるため、経路の再検知に要した時間は 3.8 秒である。4.3.2 で述べたとおり、TBRPF の仕様では、隣接ノードの検出に 3 秒かかることから、メッセージングによる経路交換、それに基づく経路再計算、経路挿入のオーバーヘッドは、0.8 秒となる。

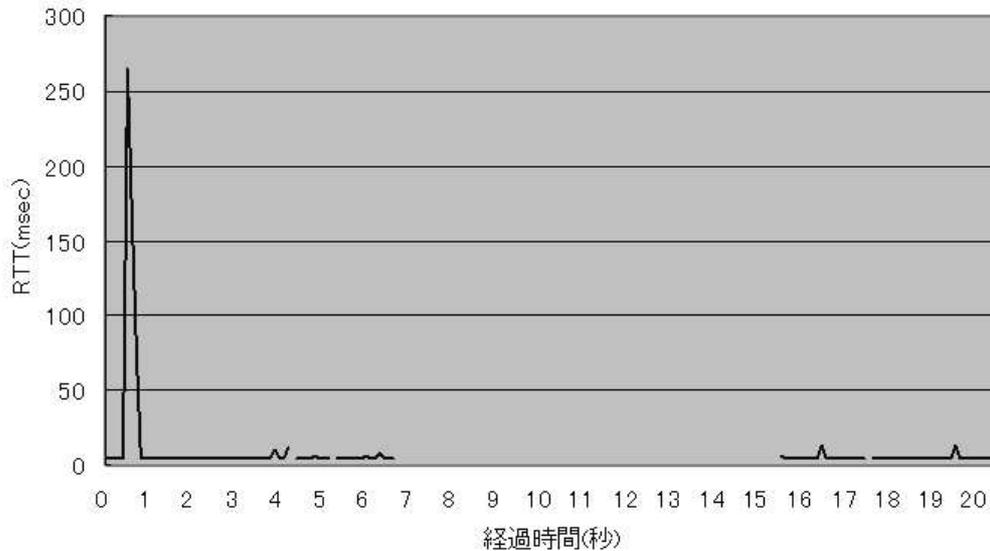


図 5.2: 収束時間の計測

RTT の最大値は、計測開始から 0.6 秒後に観測した 264.73 ms であり、最小値は、同 4.1 秒後に観測した 4.03 ms である。RTT の平均値は、8.78 ms である。

## 5.3 自動車における実証実験

本研究では、MANET を用いた車車間通信の有用性を検証するために、実自動車環境において評価を行った。

### 5.3.1 評価項目

本実験では、評価項目として収束速度、ならびに RTT を計測した。計測には ping6 を用いた。収束速度は、ping6 における到達性が失われてから、回復するまでの時間とする。

CPU	Celeron 300Mhz	Celeron 500Mhz	Pentium III 650Mhz
メモリ	64M	192M	192M
OS	FreeBSD-4.6.2-release	FreeBSD-4.6.2-release	NetBSD-1.6-release
無線デバイス	Melco Buffalo WLI-PCM-L11	Melco Buffalo WLI-PCM-L11	Melco Buffalo WLI-PCM-L11
アドレス	3ffe:4::1	3ffe:3::1	3ffe:2::1

表 5.3: 実験環境

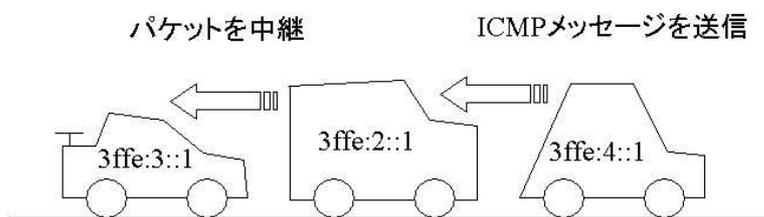


図 5.3: 実験初期時

### 5.3.2 実験環境

本実験では、ノート PC 3 台を自動車に載せて実験を行った。3 台のノート PC の構成を図 5.3 に示す。

### 5.3.3 実験概要

実験は、3 台の自動車を縦列に並走させて行った。並走速度は 30km/h である。各自動車には、IEEE 802.11b デバイスを装着したノート型 PC を搭載している。計測には ping6 を用いた。本実験では、3ffe:4::1 の自動車から、3ffe:3::1 の自動車に対して ICMP メッセージを送信した。その際、メッセージは、3ffe:2::1 の自動車を經由することにより、マルチホップの通信環境を実現している。実験開始時の自動車の配置図を図 5.3 に示す。本実験では、実験初期の状態から 3 段階の自動車の配置変更を行うことにより、3 つの実験を行った。

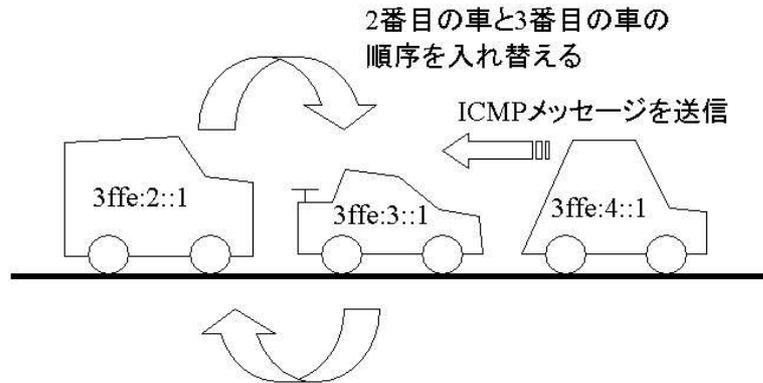


図 5.4: 加速追い抜き実験

#### 加速追い抜き実験

加速追い抜き実験の概要を図 5.4に示す。

初期状態から、3ffe:3::1 のアドレスを持った自動車は、3ffe:2::1 のアドレスを持った自動車を加速して追い抜く。3ffe:4::1 の自動車が、3ffe:3::1 の自動車を隣接ノードとして認識し、2 台の自動車が直接通信を行うようになったら、3 台は 30km/h での並走状態になり、実験を終了する。

#### 減速追い抜き実験

減速追い抜き実験の概要を図 5.5に示す。

加速追い抜き実験終了時から、3ffe:3::1 のアドレスを持った自動車が減速し、3ffe:2::1 のアドレスを持った自動車の後方につく。3ffe:4::1 の自動車が、3ffe:3::1 の自動車が、3ffe:2::1 の自動車を中継した 2 ホップになったことを確認したら、3 台は 30km/h の並走状態になり、実験を終了する。

#### 停車実験

停車実験の概要を図 5.6に示す。

停車実験では、減速追い抜き実験終了時の自動車の配置構成を保ったまま、3 台が停車することで行う。その際も、3ffe:4::1 のアドレスを持った自動車から、3ffe:3::1 の自動車に 3ffe:2::1 のアドレスを持った自動車を經由して ICMP メッセージを送信し続け

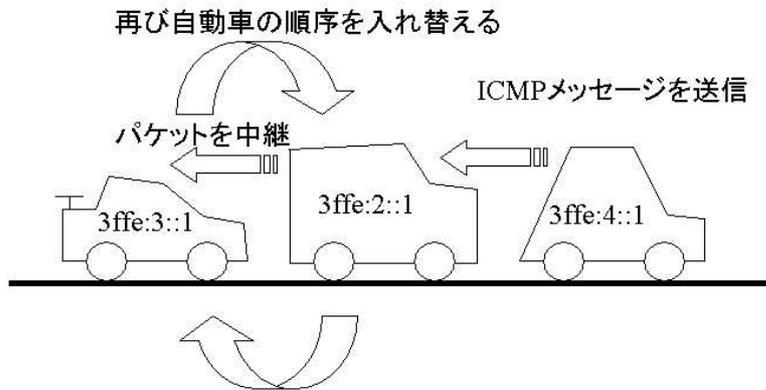


図 5.5: 減速追い抜き実験

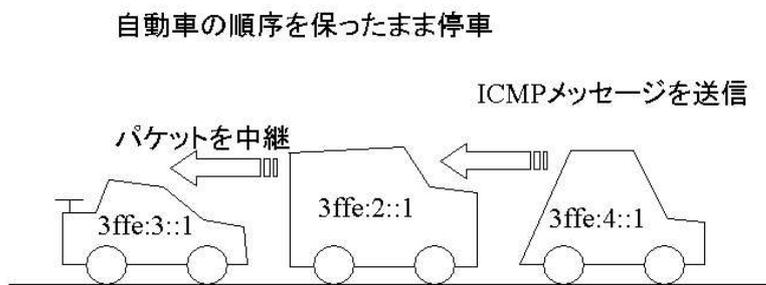


図 5.6: 停車実験

る。3台が完全に停車することで実験を終了する。

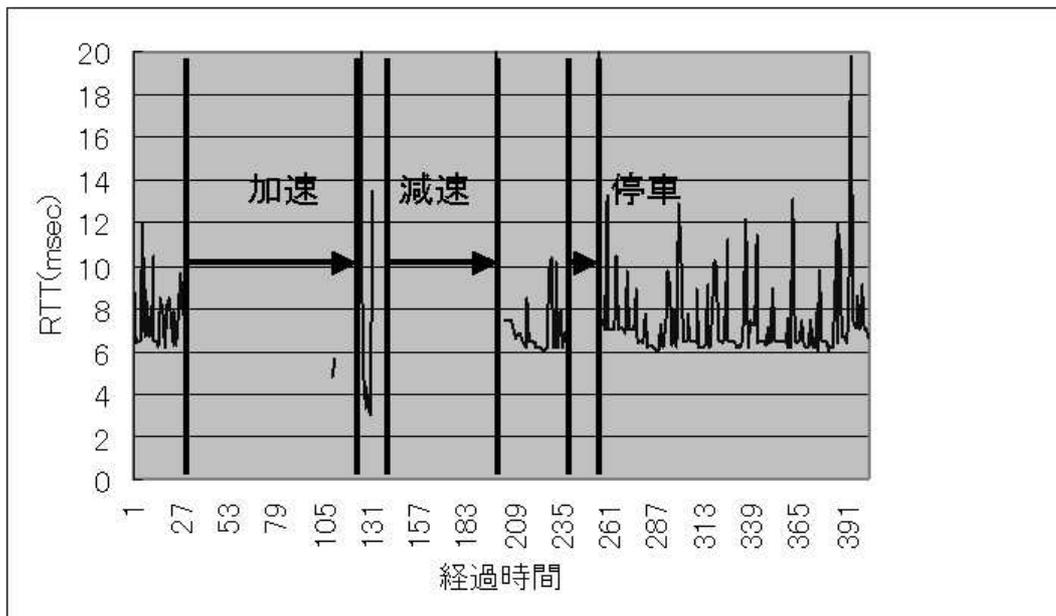


図 5.7: 到達性

### 5.3.4 実験評価結果

本項では、実自動車環境における評価実験の結果について述べる。まず、遅延/到達性の計測グラフを図 5.7 に示す。グラフは、x 軸は実験開始時からの経過時間、y 軸は RTT をそれぞれ示す。

図 5.7 において、グラフに線が表示されていない部分は、送信した ICMP echo request に対する ICMP echo reply が得られていない部分である。実験において送信された ICMP echo request は 405 パケットであり、パケットロス は 226 パケットである。パケットロス は 44

図 5.7 において、シーケンス番号 124、197、254 のメッセージに対する応答は、それぞれ 483.27 ms、481.47 ms、478.42 ms という 3 つの外れ値を計測している。これは、Neighbor Discovery Protocol における、Neighbor Solicitation の処理を行っているためと思われる。よってこの 3 つの観測値を外れ値として扱う。通信を行えているときの通信遅延の最大値は、経過時間 124 秒において観測した 483.27 ms である。外れ値を考慮しない際の最大値は、経過時間 376 秒において観測した 19.79 ms である。最小値は、経過時間 129 秒における 3.02 ms である。通信を行えている際の RTT の平均値は、13.59 ms となっている。

ping6 による到達性をもとにした収束時間は、加速追い抜き実験の際には 95 秒、減

速追い抜き実験の際には 55 秒、停車実験の際には、16 秒かかっている。

## 5.4 実験考察

本研究では、TBRPF を用いた車車間通信環境における MANET の評価実験を行った。結果として、トポロジが収束するまでに、シーケンス番号の差分をもとにすると、それぞれの実験において、95 秒、55 秒、16 秒という結果が見られる。これらの収束時間の要因として、TBRPF によるトポロジ再計算のオーバーヘッドと、IEEE 802.11b デバイスの受信エラーによるものが考えられる。

TBRPF による、トポロジ再計算のオーバーヘッドは、動作検証実験から、待機時間を含めて 8.8 秒という結果が出ている。これにより、実車実験において、逸脱した収束時間として計測された、95 秒、55 秒という結果は、無線デバイスの影響によるところが大きいといえる。停車実験時に観測された 16 秒という結果は、他の実験で観測された値と比較し小さい値であるが、やはり動作検証実験と比較して 2 倍近い開きを持った値であり、動作検証実験から想定される値からは外れる。停車実験に基づいて、自動車の減速時においても、無線デバイスは自動車の速度変化の影響を受けていると考えられる。以上から、IEEE 802.11b デバイスは、相対速度が大きい環境、速度変化が大きい環境では通信品質に大きな影響を受けるといえる。IEEE 802.11b デバイスを用いた車車間通信の環境としては、相対速度、絶対速度ともに低い渋滞中での通信が考えられる。

IEEE 802.11b デバイスの受信エラーの原因として、ドップラー現象、フェージングの影響が考えられる。ドップラー現象とは、電波送信者と電波受信者の間の相対速度が大きくなることで、電波の周波数が変動する現象である。フェージングとは、電波の受信者において、受信電波のレベル差が生じ、電波の受信品質が低下する現象である。道路環境においては、直接波と道路による反射波を受信者が受け取ることにより起こるマルチパスフェージングによる影響が考えられる。本実験においては、それぞれの自動車の相対速度は大きくなっていった。よって、ドップラー現象による影響があったものと考えられる。自動車通信環境における電波の品質を測定することにより、マルチパスフェージングの影響を測定することが今後の課題の 1 つである。

トポロジ変化に関し、3ffe:3::1 の自動車は、3ffe:4::1 の自動車の隣接ノードに切り替わり、再び、3ffe:2::1 の自動車を介した 2 ホップの自動車となった。つまり、自動車の実際の動作に伴ったトポロジ変化の検出を行うことができた。これにより、本研究では、自動車間のアドホックネットワークのマルチホップ通信を、TBRPF によって実現できることを実証した。

## 第6章 結論

### 6.1 まとめ

本研究では、インターネット自動車のモデルに適した車車間通信環境を定義した。現在、汎用的な自動車通信環境を提供するモデルとしてインターネット自動車がある。インターネット自動車は、自動車を移動するネットワークとして捉え、自動車内のノードにインターネットの接続性を提供している。移動するネットワークであるインターネット自動車において、ネットワークベースでのルーティングをサポートしている MANET ルーティングプロトコルである TBRPF を IPv6 を用いて実装した。その上で、TBRPF の動作実験を行い、また IEEE802.11b デバイスの動作検証を実際の自動車環境において行った。そして、それらをもとにした車車間マルチホップ通信環境の評価実験を行った。本研究では、インターネット技術の 1 つである、MANET 技術を用いることでインターネット自動車間のマルチホップ車車間通信環境を構築した。

### 6.2 今後の課題

本研究で行った車車間マルチホップ通信評価実験において、IEEE 802.11b デバイスを車車間の定常的な通信に用いることは困難であることがわかった。理由として、IEEE 802.11b デバイスは、自動車の絶対速度が上がると通信の品質が極端に落ちること、自動車同士の相対速度が大きくなると通信ができなくなること、が挙げられる。これらの問題点を解決するデバイスを発見することが 1 つの課題である。

本研究では、車車間通信の中でも、特に自動車によるアドホックネットワークの形成に焦点を絞った議論を行った。結果として、MANET ルーティングプロトコルから TBRPF を選択、実装し、車車間アドホックネットワークの実現を行った。車車間通信環境を実現するために、今後必要な技術として以下のものが考えられる。

- 複数車線を考慮したルーティング機構
- 複数通信環境切り替え機構
- 通信環境選択ポリシー制御機構
- 自動車環境における名前解決機構

本研究では、車車間通信を同一車線にのみ絞って議論してきた。よって、反対車線も考慮したルーティングを可能にする機構が必要である。その際に、複数の性質を持

つ MANET ルーティングプロトコルの経路を抽象化し、統合するための機構が必要である。

また、それらのルーティングプロトコルを、ネットワークの性質と通信の種類によって使い分ける機構も求められる。さらに、車車間通信環境の通信品質が著しく低下した際には、車内に装備されている他の通信メディアを用いた通信に切り替えるための機構も必要である。

自動車には、様々な通信メディアが搭載されている。そして、アプリケーションの通信に対する要求も多岐にわたる。車内動画交換アプリケーションでは、通信の信頼性より通信帯域と通信の即時性に対する要求が高いため、車車間通信環境において通信することが望ましい。また、メールの受信は、外部の信頼できるネットワークにサーバが存在することが想定されるために、携帯電話のような広域通信メディアを用いることが必要である。以上のような、サービス毎に通信メディアを切り替えるためのポリシー制御機構を開発することが課題である。

自動車同士の通信においては、「右前方 2 台先の自動車」等のような曖昧な通信相手が想定される。曖昧な情報から、通信相手自動車を識別する必要がある。この機能を実現するために、GPS を用いた位置情報による通信相手識別機構が考えられる。

また、本研究が想定するアプリケーションとして、グループコミュニケーションシステムをあげた。グループコミュニケーションシステムでは、車内動画の交換や、メッセージの交換を行うことができる。この想定アプリケーションを開発することで、本研究の有用性を実証する。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、御指導を頂きました、慶應義塾大学環境情報学部教授の村井純博士、徳田英幸博士、同学部助教授の楠本博之博士、中村修博士、同大学環境情報学部専任講師の南政樹氏、重近範行氏に感謝致します。

絶えずご指導とご助言を頂きました、慶應義塾大学政策・メディア研究科特別研究専任講師植原啓介氏、東京大学情報基盤センター助手関谷勇司氏、慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期博士課程の小原泰弘氏、湧川隆次氏、川喜田佑介氏、同研究科修士課程の日野哲志氏、若山史郎氏に深く感謝します。

本研究を進めていく上でご支援下さった慶應義塾大学環境情報学部久松剛氏、成瀬大亮氏、慶應義塾大学総合政策学部堀場勝弘氏、高橋宏明氏、そして慶應義塾大学 徳田・村井・楠本・中村・南合同研究室 NACM 研究グループの皆様を始め、支えてくださった全ての方々に感謝します。

## 参考文献

- [1] 国土交通省 ITS ホームページ. <http://www.its.go.jp/ITS/j-html/index.html>.
- [2] G-BOOK(Gazoo Mobility Searvice) ホームページ. <http://g-book.com/>.
- [3] 日産 CARWINGS. <http://www.nissan.co.jp/CARWINGS/>.
- [4] インターネット自動車プロジェクト. <http://www.sfc.wide.ad.jp/InternetCAR/>.
- [5] Charles E. Perkins. *Ad Hoc Networking*. Addison-Wesley Pub Co, Dec 2000.
- [6] Richard G. Ogier, Mark G. Lewis, Fred L. Templin, Bhargav Bellur. Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF). Nov 2002.
- [7] Dedicated Short Range Communications ホームページ. <http://www.leearmstrong.com/DSRC/DSRCHomeset.htm>.
- [8] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko. Mobility support in ipv6. Jan 2003.
- [9] Thierry Ernst. Network Mobility Support Requirements. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-nemo-requirements-00.txt>, Feb 2003.
- [10] S. Deering, R. Hinden. Internet Protocol, Version 6 (IPv6). <http://www.ietf.org/rfc/rfc1883.txt>, Dec 1995.
- [11] David B. Johnson, David A. Maltz, Yih-Chun Hu, Jorjeta G. Jetcheva, Carnegie Mellon. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR). <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-07.txt>, Feb 2002.
- [12] Charles E. Perkins, Elizabeth M. Belding-Royer, Samir R. Das. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-olsr-07.txt>, Jun 2003.
- [13] Thomas Clausen, Philippe Jacquet, Anis Laouiti, Pascale Minet, Paul, Muhlethaler, Amir Qayyum, Laurent Viennot. Optimized Link State Routing Protocol. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-olsr-07.txt>, Jun 2003.

- [14] Zygmunt J. Haas, Marc R. Pearlman, Prince Samar. The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-zone-zrp-04.txt>, Jun 2003.