卒業製作 2001 年度 (平成 13 年度)

インターネット自動車における
車載ルータシステムの設計と実装

慶應義塾大学 環境情報学部

三屋光史朗

t98931km@sfc.keio.ac.jp

指導教員

村井 純

徳田 英幸

楠本 博之

中村 修

南 政樹

平成 14 年 2 月 18 日

概 要

本研究では，複数の通信メディアを利用しながら移動するノード集合体に，インターネット接続性や移動透過性を保証する通信モデルを提案する．また，本モデルに従い，インターネット自動車における車載ルータシステムの設計と実装を行なった．

自動車は，センサノードや搭乗者がもつ計算機等のノードの集合体である．搭乗者は，PDA や携帯電話，センサノード等を保有している．これらのノード集合体は，人間と共に移動するオブジェクト群である．また，自動車は携帯電話や無線 LAN 等の複数の通信メディアを利用してインターネットに接続される．

インターネットアーキテクチャは，ワークステーションや PC 等の移動しない固定ノードを前提に設計されている．したがって，自動車のような移動ノードに固定ノードと同様の利便性を提供するためには，移動透過性保証の実現が重要となる．ここでいう利便性とは，一意の IP アドレスを用いて特定のノードに到達できることや，セッションを長時間維持できること等の性質を指す．

現在提案されている移動透過性保証プロトコルは，個々のノードに移動透過性を保証することを目的としている．さらに，ノード集合体への移動透過性保証を実現する取り組みが始まっている．

本研究では，ノード集合体を，あるノードが代表してインターネットに接続する機能や移動透過性を保証する通信モデルを提案する．自動車にはセンサノード等の，簡易な通信スタックや限られた通信インターフェースしか持たないノードも存在する．提案するモデルでは，外部ネットワークとの接続性や移動透過性等の機能を代表ノードに集中させることで，その他のノードに新たな技術的機構を必要とせずに通信できる．また，代表ノードが外部とのインターネット接続機能を提供するため，その他のノードは代表ノードに接続する機能のみをもてばよい．

提案するモデルに基づき，車載ルータシステムを設計し構築した．車載ルータシステムは，代表ノードとしてのルータを自動車に搭載する通信システムである．車載ルータは，ネットワークの移動透過性保証機構及び，インターフェース切替え機構をもつ．前者は，その他のノードが接続される自動車内のネットワークに対して移動透過性を保証する機構である．後者は，そのネットワークにより安定したインターネット接続性を提供する機構である．

本研究の評価として，インターネット ITS プロジェクトにおける実証実験，各機構の有効性を示す定性的評価，実際の通信における定量的評価を行った．その結果，ノード集合体への移動透過性の保証，及びインターフェース切替えが行なえることを確認し，本研究で提案する通信モデルの有効性を実証できた．

Abstract

This research proposes a communication model which ensures Internet connectivity and network transparency to a group of nodes possed with several network interface devices. Moreover, based on the suggested model, we have designed and implemented In-vehicle Router System for Internet connected automobiles.

An automobile is a group of nodes, consists with senser nodes and devices which is held by passengers. Likewise, passengers can also be considered as a group of nodes with PDA's and cellular phones. These group of nodes are connected to the Internet using several communication devices such as cellular phones and Wireless LANs.

The Internet architecture was originally designed on the assumption that node doesn't move such as work stations and PCs. Thus, Mobility Support becomes an important issue. to support the same connectivity to nodes with network transparency, Connectivity in this research means reachability to a specific node with the unchanged IP address.

In automobiles, there are nodes with only limited communication interface or simple communication protocol stack due to hardware limitations. In the model proposed in this research, nodes under the network routed by the representing node do not need to support any new system. This is possible by concentrating all the features regarding Internet connectivity and network transparency into the representing node. Moreover, because the representing node support Internet connectivity feature, there are merits for other nodes in which they require only connectivity to the representing node.

Based on the suggested model, we have designed and implemented in-vehicle router system. In-vehicle router system is a communication system to embark a router in automobiles as the representing node. This in-vehicle router posses both Network Mobility Support and Interface Switching mechanism. The former is a feature which ensure network transparency to the network inside the automobile, where other nodes are connected to. The latter is a feature to support Wide range/area Internet connectivity to that network.

As an evaluation for this research, we have tested the system in InternetITS Project. Moreover, we have performed qualitative evaluation to prove effectiveness of each features, and mensurative evaluation based on the actual communication. As a result, we were able to ensure network transparency to a group of nodes, and showed the Interface Switching feature to function, and proved the effectiveness of the proposed communication model in this research.

目 次

第 1 章　序論 **5**

1.1　背景 5

1.2　本研究の目的 6

1.3　本論文の構成 6

第 2 章　インターネット自動車の通信モデル **7**

2.1　想定している自動車環境 7

2.2　通信システムへの要求事項 8

2.3　通信モデル 9

2.3.1　End 通信モデルと代理通信モデル 9

2.3.2　End 通信モデルを実現するアプローチ 10

2.3.3　インターネット自動車の通信モデル 11

第 3 章　関連研究 **13**

3.1　移動体支援に関する既存研究 13

3.1.1　Mobile IPv6 13

3.1.2　I/F Switch 16

3.1.3　ネットワークの移動透保証機構 16

3.1.4　Mobile Ad-hoc Network 17

3.2　考察 18

第 4 章　車載ルータシステム設計 **20**

4.1　車載ルータシステム 20

4.1.1　車載ルータシステム設計概要 21

4.1.2　車載ルータシステム動作概要 22

4.2　Mobile Subnet 概要 23

4.3　I/F Switch 概要 24

4.3.1　default route と NDP cache の関係 25

4.3.2　IPv4 リンク上での IPv6 を用いた通信 26

第 5 章　車載ルータシステム実装 **27**

5.1　実装環境 27

5.2　車載ルータシステム実装概要 27

5.2.1　拡張オプション処理の流れ 29

5.2.2　Binding Update List 管理部 30

5.2.3　Binding Cache 管理部 30

5.2.4 Home Address の格納方法 31
5.3 車載ルータシステムが保持すべきデータ及びそのデータ構造 31
5.4 車載ルータシステム制御機構 32
5.5 インターフェース切替えに関連する追加機能 33
5.5.1 default router 管理機構の改変 33
5.5.2 default router の更新 34
5.6 IPv4 リンク上での IPv6 を用いた通信 34

第 6 章 車載ルータシステム評価 **36**
6.1 定性的評価 36
6.1.1 実験環境 36
6.1.2 実験結果 36
6.2 定量的評価 38
6.2.1 実験環境 38
6.2.2 実験結果 39

第 7 章 結論 **42**
7.1 まとめ 42
7.2 今後の課題 42

図 目 次

2.1 複数のノードと複数の通信デバイスをもつ自動車通信環境 8
2.2 End 通信モデルと代理通信モデル 10
2.3 End 通信モデルへのアプローチ 11
2.4 自動車の通信モデル概要 12

3.1 MN の移動後の処理 15
3.2 Binding 登録処理後の Home Agent の役割 15
3.3 Mobile Subnet の概要 17

4.1 各機構の協調動作 21
4.2 車載ルータシステム設計概要 22
4.3 Mobile Subnet 機構 23
4.4 I/F switch 概要 25
4.5 CoA 決定部概要 26

5.1 高機能実験車ネットワーク構成 (出典：インターネット ITS 会議資料) 28
5.2 車載ルータの実装概要 29
5.3 宛先オプションヘッダ処理関数への拡張 30
5.4 車載ルータのデータ構造 31
5.5 mobileip_softc 構造体 32
5.6 車載ルータの制御機構 33
5.7 default router の更新 35

6.1 ping 出力例 37
6.2 定量的評価の実験環境 39
6.3 車内ノードと外部ノード間の RTT 40
6.4 帯域の変化 41

表 目 次

3.1 要求事項と解決している問題 18

4.1 通信ノードの Binding Cache 25

6.1 定性的評価の実験環境 36
6.2 Mobile Subnet 機構の動作確認結果 37
6.3 インターフェース切替え動作確認結果 38
6.4 定量的評価の実験環境 38

第1章　序論

本章では，本研究の背景，及び目的について述べる．また，本論文の構成について述べる．

1.1　背景

近年，自動車の情報化が進み，テレマティクス (TELEMATICS) 等の分野が注目されている．テレマティクスとは，通信（TELECOMMUNICATION）と情報科学（INFORMATICS）を組み合わせた言葉であり，車両および携帯端末へ情報を提供するサービスや製品，サポートシステムのコンセプトを指す．テレマティクスには，次世代の自動車システムである Intelligent Transport Systems(ITS) を含め，安全，環境，エンターテイメントに関連した多様なコンセプトが期待されている．

テレマティクスの分野では，有料道路自動料金収集システム (ETC)[1] や MONET[2] といったサービスが既に開始されている．ETC は，狭域無線通信を利用して有料道路の料金決済を可能にしたもので，料金所で停止することなく通行料金の支払いができるサービスである．MONET は，天気予報やニュースといった内容を配信する自動車向けの情報提供サービスである．このように，自動車がネットワークに繋がり，その上で様々なサービスが展開されようとしている．

しかし，自動車情報サービスの多くはサービス毎に独自の通信基盤を構築している．新しくサービスを提供するためには，専用の通信基盤や機器が必要になる．そのため，サービスを提供する側にも提供される側にも多大なコスト増が強いられている．また，独自のネットワークで構成されるため，サービス間の連係が困難である．したがって，安価にサービスを提供するためやサービス間の連携を促すために，共通の自動車情報通信基盤の構築が望まれている．

分散している情報の共有や相互利用の基盤として最も成功しているのは，インターネットである．インターネットは人々の生活に深く浸透し，様々な利便性をユーザに提供している．また，インターネット上には様々なサービスが存在し，相互に情報を共有し，協調動作している．そこで，このようなインターネットの特徴を活かして自動車を情報化する研究が行われている．インターネットを利用することで様々なサービスを単一の情報基盤上に展開でき，かつ各サービス系を超えて情報交換できる．インターネットに接続された自動車が普及すれば，自動車の情報化が一層進む．利用者は，安全，環境，エンターテインメントなどの様々な面でメリットを享受できる．自動車の情報化は社会全体の利益に繋がり，大規模な新規市場形成や情報通信社会を支援する．

インターネット自動車プロジェクトは，自動車をインターネット上で扱うための枠組を提案している．具体的には，情報交換形式の定義，通信システムに関する研究である．情報交換形式の定義とは，自動車で取得した固有の情報を一般的な情報に正規化し，流通するための枠組である．また，通信システムに関する研究では，自動車の通信環境に適した移動体支援技術の提案や開発を行っている．

インターネット自動車プロジェクトの関連プロジェクトとして，インターネット ITS プロジェクト [3] がある．インターネット ITS とは、IPv6 を基礎とした ITS の共通基盤である．ITS の基盤技術を共有することで ITS 分野への参入コストを低減し，自動車産業界と情報産業界をはじめ

とした業種間・事業者間のコラボレーションによる研究開発の加速と，アプリケーションに関するアイデアをもつ様々な業種・事業者の参入を促進することが可能となる．インターネット ITS プロジェクトは，インターネット ITS の基盤を構築し，それを利用した様々なアプリケーションを実証することを目的としている．また，技術的課題と事業化の可能性を検証するために約 2000 台規模での大規模実証実験と 1 台の高機能実験車の作成を行なう．高機能実験車は，IPv6 による車内ネットワーク化，通信メディアに依存しない自動車用ルータ機能の実現を目的としている．インターネット ITS の目標を想定し，将来実現されるシステムの一部を具現化した高機能実験車を作成する．その上で，技術の実証実験とアプリケーションの検証を行なう．

一方，既存のインターネットアーキテクチャは，PC のような移動しない計算機を前提に構築されている．そのため，自動車をインターネットに接続する際に様々な制約や問題が起こる．例えば，ネットワークを移動することにより，使用中のセッションが切断される．また，ノード識別子である IP アドレスの変化に起因して通信相手が特定できなくなり，通信を再開できない．

これらの問題を解決するために，インターネットにおける移動体支援に関する研究が行われている．しかし，これらの研究は自動車を対象としてきたわけではなく，携帯電話やラップトップコンピュータのような個々の計算機を対象としてきた．自動車はセンサや搭乗者がもつ Personal Digital Assistants(PDA) 等の多くの計算機を含むノードの集合体である．よって，これらの移動体支援に関する研究を自動車に応用するためには，更なる改良や周辺技術の開発が必要である．

1.2 本研究の目的

本研究では，自動車をインターネットに接続するための自動車通信アーキテクチャを構築する．自動車は，複数の計算機や複数の通信インターフェースをもつ．このような環境へ応用可能な移動体支援機構を実現する．その目的を実現するために，自動車通信環境に適した通信モデルを提案する．また，そのモデルに従い，インターネット自動車における車載ルータシステムの設計と実装を行う．本研究により，インターネット自動車の通信基盤が実現される．

1.3 本論文の構成

本論文は，以下のように構成される．

第 2 章では，想定している自動車通信環境について述べる．自動車は，ノード集合体であり，複数の通信インターフェースを備える移動体である．この通信環境に適したインターネット自動車の通信モデルを提案する．第 3 章では，移動体支援に関する既存の研究について述べる．インターネット自動車の通信モデルと比較しながら，既存の研究の問題点を整理する．第 4 章では，インターネット自動車の通信モデルに基づいた車載ルータシステムの設計を行う．第 5 章では，車載ルータシステムの実装について述べる．第 6 章では，車載ルータシステムの評価を行う．インターネット ITS プロジェクトにおける実証実験，各機構の有効性を示す定性的評価，実際の通信における定量的評価を行う．これにより，本研究で提案する通信モデルの有効性を確認する．第 7 章をもって結論とし，まとめと今後の課題を述べる．

第2章　インターネット自動車の通信モデル

本章では，本研究で想定している自動車環境について述べる．また，それらの自動車環境から通信に関係のある部分をモデル化する．このモデルを用いて，インターネット自動車に適した通信モデルを提案する．

2.1　想定している自動車環境

自動車内には，様々な目的をもった複数のノードが存在する．インターネット自動車では，複数のノードを用いることで次のようなアプリケーションを想定している．

プローブ情報システム

自動車には，速度，ワイパーの on/off，ブレーキの踏み具合などの情報を収集するために，数多くのセンサノードが存在する．センサノードとは，特定の情報を収集することを目的に設計されたサービス指向型のマイクロノードである．マイクロノードは，単一情報の入出力機構しかもたない．限られた API，最低限の機能だけの簡易な通信スタック，特定の通信インターフェースで構成される．そのため，PC や PDA のような汎用ノードに対して，簡単，安価，小型という特徴をもつ．

プローブ情報システム [4][5] は，これらのセンサノードから情報収集し，有益な情報に変換するアプリケーションである．例えば，複数の自動車からワイパーの on/off 情報を収集すると，実際の降雨状況が分かる．ABS 動作状態の情報を収集すると，道路上の危険なポイントが分かる．気温や気圧，湿度などの情報を収集すると，より精度が高い地域での天気予報ができる．これらの情報は，情報提供車の増加に従い情報の精度や規模が増し，より有益な情報に変換できる．

健康管理

搭乗者である人間は，携帯電話や時計等のノードを携帯する．また，健康管理や情報提供のためのセンサノードを携帯する．腕時計や自動車のシートから，血圧や心拍数といった健康情報が取得できる．インターネットを利用して，これらの情報を収集することで，運転者や同乗者の健康状態や心理状態が遠隔地からも把握できるようになる．これらの情報は，事故防止や病気の早期発見に利用できる．

グループコミュニケーション

バスや電車等では，搭乗者がラップトップコンピュータや PDA を介してインターネットを利用する．電子メールの送受信や World Wide Web (WWW) 閲覧に留まらず，デレビ電話会議やスケジュール管理などを行う．インターネットを利用するため，会社や家庭にある計算機との通

信も容易である．例えば，テレビ電話会議アプリケーションを利用して，タクシーやバスの各席から動画音声付オンラインミーティングが可能である．

このように，自動車はセンサノードや搭乗者の計算機などの多くのノードで構成されるノード集合体である．また，搭乗者も腕時計やPDA，携帯電話などで構成されるノードの集合体と考えられる．これらのノード集合体は，人間と共に移動するオブジェクト群である．自動車と搭乗者のように，ノード集合体のなかにノード集合体が参加する場合もある．

また，自動車は複数の通信メディアを利用することを想定している．自動車のような移動するノードがインターネットに接続するために利用できる通信メディアがいくつか存在する．例えば，携帯電話，無線LAN，PHSなどである．携帯電話は，広域で利用可能であるが，高遅延や低帯域などの問題がある．無線LANは，携帯電話に対して低遅延，高帯域であるが，通信エリアが限られている．通信メディアの適応範囲や特徴を考慮すると，自動車では走行状況や環境に応じて通信メディアを切替えて利用すべきである．

図2.1は，本研究で想定している自動車通信環境を表している．図中の四角はノードを，斜線は通信メディアを表している．図中のPDCはPersonal Digital Cellularの略で，携帯電話を表している．

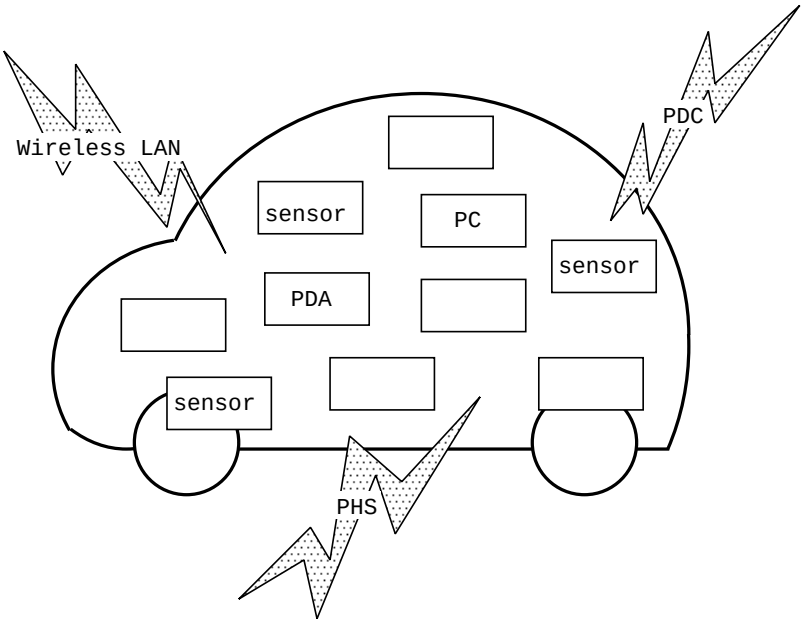

図 2.1: 複数のノードと複数の通信デバイスをもつ自動車通信環境

本研究では，自動車が複数のノードを搭載し，複数の通信メディアを利用しながら移動することを想定している．

2.2 通信システムへの要求事項

インターネット自動車の通信システムを設計するためには，通信システムへの要求事項を整理しておく必要がある．要求事項を明確にすることで，解決への様々なアプローチの中から自動車環境により適したアプローチが選択できる．

通信システムへの要求事項を以下に挙げる．

- 各ノードが一意の IP アドレスを用いて到達可能
  既存のインターネットアーキテクチャでは，ネットワークを移動することに起因して，ノードの識別子である IP アドレスが変化する．この IP アドレスの変化により，車内ノードの識別子を失うことになる．したがって，車内ノードへ到達できなくなる．自動車用のテレビ会議システムを利用する場合は， 常に固定のグローバル IP アドレスを用いて識別可能であることが望まれる．

- 移動してもセッションが維持可能
  既存のインターネットアーキテクチャでは，ネットワークを移動することに起因して，ノードの識別子である IP アドレスが変化する．この IP アドレスの変化によって，通信中のセッションが遮断される．音楽配信アプリケーションを利用している際に，配信が止まってしまう．これを防ぐために，移動してもセッションが維持できることが望まれる．

- 新しい機構が不要
  センサノードのようなマイクロノードは，新しい機構を組み込むことができない．これらのノードは、現状の機構のみで通信できることが望まれる．

- 限られた通信インターフェースしか備えないノードでも通信可能
  センサノードは通信インターフェースとして Ethernet しかもたない．携帯電話のような無線通信インターフェースをもたないノードでも，移動しながら通信できることが望まれる．

- 帯域の確保
  動画音声付オンラインミーティングなどのアプリケーションでは，可能な限り帯域を確保することが望まれる．

- 常時接続
  インターネットに常に接続できる．接続できない状態では，情報交換ができない．より広範囲なエリアでインターネットに接続できることが望まれる．

2.3 通信モデル

前述した自動車通信環境において，通信システムへの要求事項を満たすための通信モデルを考察する．

2.3.1 End 通信モデルと代理通信モデル

まず，インターネットから自動車内のノードを，どのように扱うべきかを検討する．

図 2.2 に，2 つのモデルを示す．(a) のモデルは，自動車内の各ノードが，外部のノードに対して End to End 通信が行える様子を表している．このモデルを End 通信モデルと呼ぶ．(b) のモデルは，自動車内の情報を集中管理するノードがあり，そのノードが外部のノードと通信している様子を表している．このモデルを，代理通信モデルと呼ぶ．また，図中の四角はノードを表していて，矢印は情報の流れを表している．

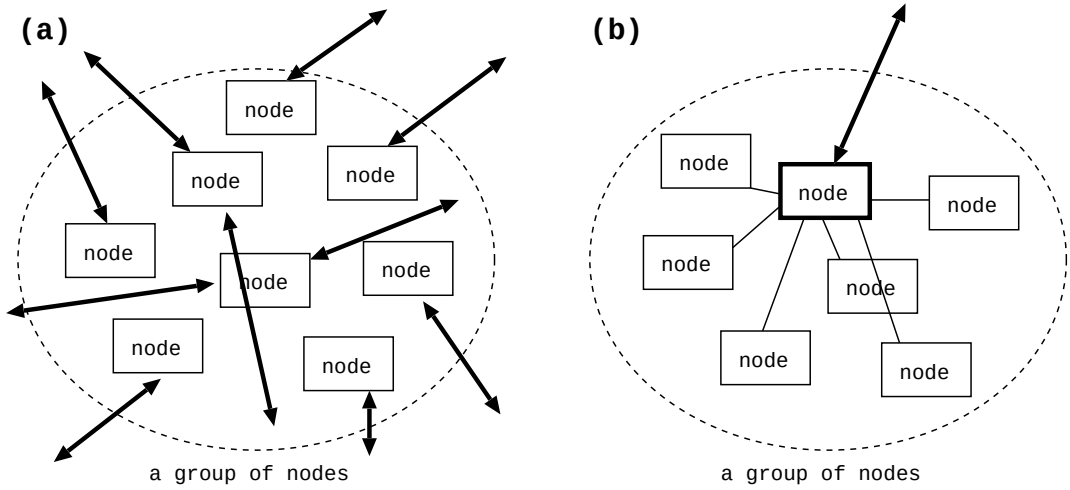

図 2.2: End 通信モデルと代理通信モデル

End 通信モデルは，各ノードが自律して情報の管理が行えることが利点である．しかし，各ノードにインターネット接続性や移動透過性保証機構を備えることは困難である．代理通信モデルは，情報を集中管理できることが利点である．自由な情報のやりとりができないことが欠点である．

前述のアプリケーションが実現できる環境を提供するためには，自動車内の各ノードに一意の IP アドレスを用いて到達できなければならない．よって，本研究では End 通信モデルを採用する．自動車内のノードは，インターネットから自由にコミュニケーションできるべきである．

2.3.2 End 通信モデルを実現するアプローチ

End 通信モデルを実現するアプローチとして，物理層，データリンク層，ネットワーク層，それぞれでの方法が考えられる．

図 2.3 に，物理層，データリンク層，ネットワーク層における End 通信モデルへのアプローチを示す．図中の丸はノード，三角は通信インターフェースを表している．Independent Physical Layer は，物理層における End 通信モデルへのアプローチを表している．Shared Datalink Layer は，データリンク層における End 通信モデルへのアプローチを表している．Shared Network Layer は，ネットワーク層における End 通信モデルへのアプローチを表している．

- 物理層での実現
  物理層で End 通信モデルを実現するためには，各々のノードが個別に複数の通信インターフェースを備える必要がある．すべてのノードが携帯電話や無線 LAN を備えて，インターネットに接続する．各々のノードが独立してインターネット接続性を管理するため，最も規模性が高い．

- データリンク層での実現
  データリンク層で End 通信モデルを実現するためには，図 2.3 のように，複数のノードで通信インターフェースのデータリンク層を共有する必要がある．ブリッジ機能を利用するが，通信メディア毎にブリッジを用意することは困難である．既存のアプリケーションに変更を加える必要はない．

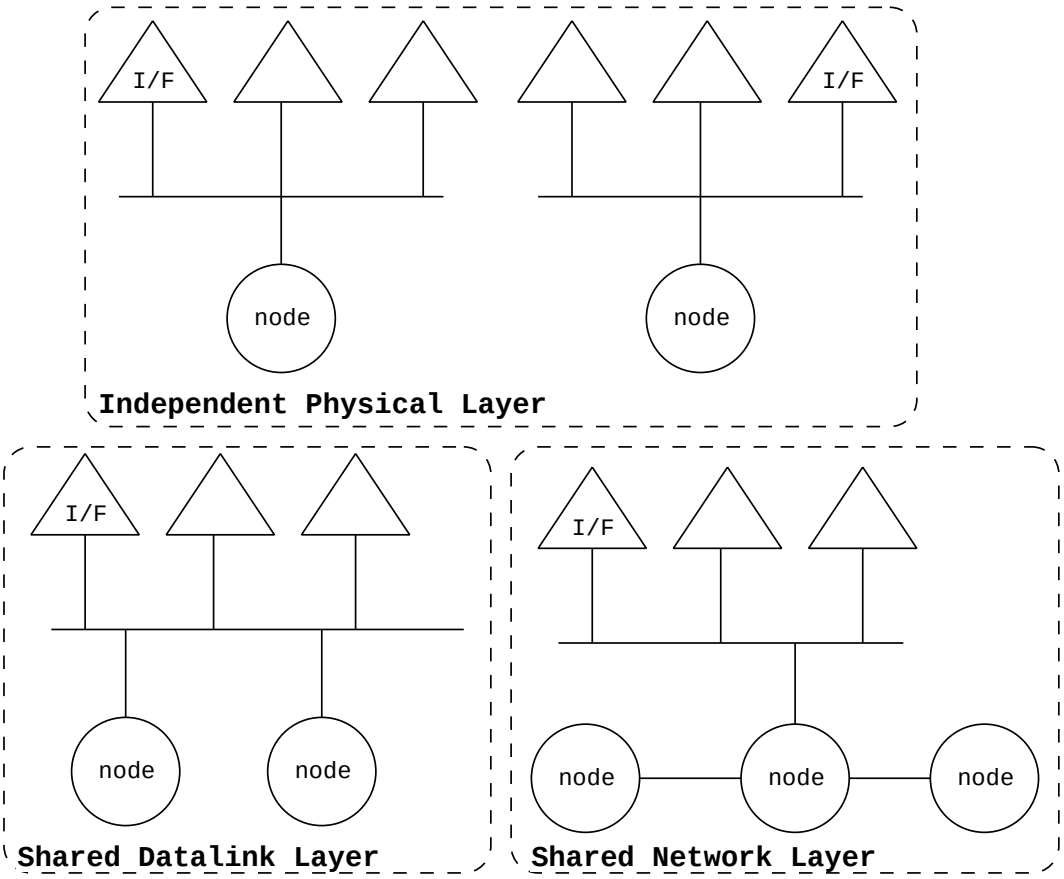

図 2.3: End 通信モデルへのアプローチ

- ネットワーク層での実現
  ネットワーク層で End 通信モデルを実現するためには，図 2.3 のように，通信インターフェースをもつノードを経由してインターネットに接続する必要がある．もっともコストが低い．

2.3.3 インターネット自動車の通信モデル

本研究では，ノードの集合体からあるノードが代表して，外部とのインターネット接続機能やネットワーク層による移動透過性保証機能をもつ通信モデルである Central Intelligent Node in a Group(CING) を提案する．CING モデルは，ネットワーク層での End 通信モデルを実現しているモデルである．

ネットワーク層での End 通信モデルを実現するモデルを採用する理由を，以下に述べる．

- センサノードの存在
  センサノードは，限られた通信インターフェースと簡易な IP スタックしかもたない．よって，複数の通信インターフェースを備えることができない．また，移動透過性を保証するための機構等を組み込むことができない．

- すべてのノードが複数の機能をもつことは非効率

自動車には 200 から 300 のノードが存在する．すべてのノードにかかる通信コストは高い．また，実装面では，数多くのプロトコルスタックに変更を加えることは不可能である．

- 通信メディアの規模性
  データリンクで移動透過性を実現するモデルは，規模性に問題がある．世界中のあらゆるところで利用可能な通信メディアの実現は非常に困難である．よって，様々な通信メディアを利用できるネットワーク層による移動透過性保証の実現が望ましい．

- アプリケーションの変更
  ネットワーク層より上位層で移動透過性を実現することは，アプリケーションに変更を加えることを意味する．すべてのアプリケーションに変更を加えることは不可能である．よって，アプリケーションに変更を加えることなく実現できるネットワーク層による移動透過性の保証が望ましい．

以上の理由から，自動車にインターネット接続性を提供するには，CING モデルが最適である．図 2.4 は，CING モデルに基づいた自動車通信モデルの概要を表している．図中の四角はノードを表して，ノードの集合体が移動している様子を表している．図中の斜線は，移動透過性等を含めたインターネット接続性を表している．CIN(Central Intelligent Node) は，代表ノードを表している．

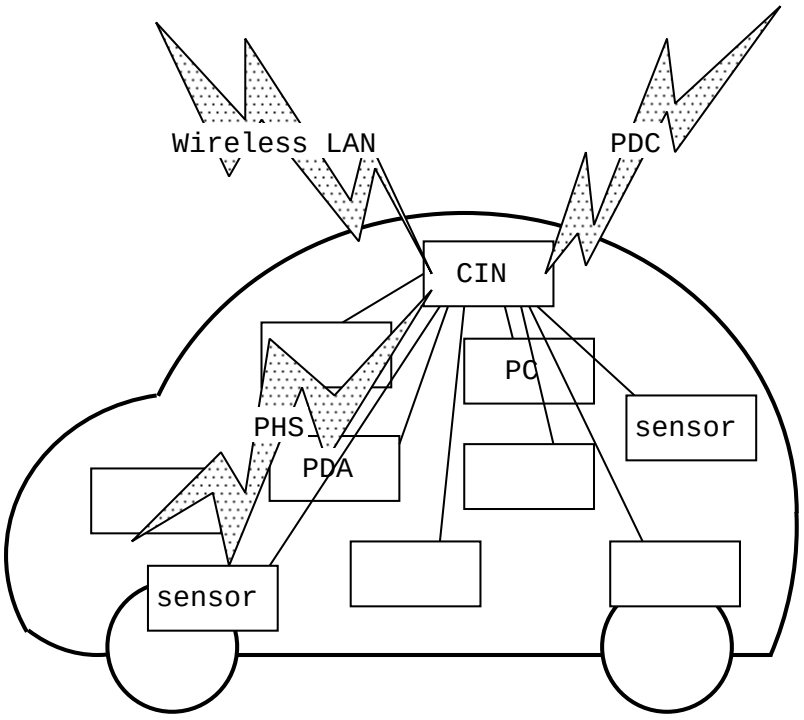

図 2.4: 自動車の通信モデル概要

CING モデルでは，CIN がインターネットへの接続性を提供するため，その他のノードは CIN に接続する機能のみをもてばよい．また，プロトコルスタックを改良して実現される機能は CIN に集中させるため，その他のノードは新たな機構を必要とせず通信できる．

第3章　関連研究

本章では，移動体通信に関する既存の研究について詳しく述べる．移動透過性保証プロトコルである「Mobile IPv6」，より安定したインターネット接続性を提供する「複数インターフェース支援機構」，Subnet の移動透過性を実現する「Network Mobility Support in IPv6(MONET)」，移動ノード間の経路制御を実現する「Mobile Ad-hoc Networks(MANET)」を紹介する．また，本研究との関連性や既存の研究における問題点について考察する．

3.1　移動体支援に関する既存研究

移動透過性実現のためのプロトコルがいくつか提案されている．例えば，Request for Comments(RFC) になっている Mobile IPv4[6]，現在議論中である Mobile IPv6[7] や Location Independent Networking for IPv6(LIN6)[8] といったプロトコルである．インターフェース切替え機構としては，Mobile IPv6 with multiple networking interface support(I/F switch) が提案されている．

3.1.1　Mobile IPv6

Mobile IPv6 は，The Internet Engineering Task Force(IETF) の IP Routing for Wireless/Mobile Hosts ワーキンググループで議論され，標準化が進められている．Mobile IPv6 は，ネットワーク層で移動透過性を保証するためのプロトコルである．また，既存のインターネットアーキテクチャへの影響を最小限に抑えるという目標で設計されている．

Mobile IPv6 を利用すると，ノードの移動透過性の保証が実現される．Mobile IPv6 は，携帯電話やラップトップコンピュータといった個体のノードに移動透過性を保証することを目的としている．そのため，自動車や電車のようなノード集合体への移動透過性保証は実現されない．

本研究では，ノード集合体への移動透過性の保証を実現するために，Mobile IPv6 を拡張したプロコトルを利用する．本研究では Mobile IPv6 を前提としているため，その仕組みを詳しく説明する．

Mobile IPv6 の用語説明

- Mobile Node(MN)
  Home Address を用いて接続性が保証され，接続ポイントを順次変更するノード．
- Home Address
  Mobile Node の Home Link で割り当てられる IP アドレス．
- Home Link
  Mobile Node の Home Address の network prefix が定義されているリンク．通常の IP routing

メカニズムに従えば，Mobile Node の Home Address に宛てられたパケットは，このリンクに配送される．

- Foreign Link
  Mobile Node の Home Link 以外のリンク．
- Home Agent(HA)
  Mobile Node の Home Link に接続されていて，Mobile Node が現在利用している Care-of address を登録しているルータ．Home Agent は，Mobile Node が Foreign Link に接続されているとき，Mobile Node の Home Address 宛てのパケットを傍受する．それをカプセル化し，登録されている Mobile Node の Care-of address に宛てて再送する．
- Care-of address(CoA)
  Mobile Node が Foreign Link に接続されている際に割り当てられるアドレス．Care-of address は複数もてる．Home Agent に登録したアドレスは，“Primary” Care-of address と呼ばれる．
- Binding
  Mobile Node の Home Address と Care-of address の対応．
- Correspondent Node(CN)
  Mobile Node と通信するすべてのノード．

Mobile IPv6 概要

MN は，インターネット上のどこに接続されていても，如何なる時でも Home Address をもって識別される．Home Link 以外に接続しているときは，そのリンクで実際に利用可能なアドレス，CoA を用いて通信を行う．MN の Home Address に宛てられた IPv6 パケットは，CoA を用いることで透過的に配送される．

Mobile IPv6 では，各 IPv6 ノードが MN の Home Address と CoA を対応づけた Binding を保持する．そのため，CN が MN に対してパケットを送信する際に直接 CoA を宛先に指定できる．

Mobile IPv6 では，この操作を可能にするために新しい IPv6 destination option をいくつか定義している．よって，Mobile IPv6 を導入するためには，これらのオプションをサポートしている必要がある．

Mobile IPv6 の仕組み

Mobile IPv6 では，Home Agent は移動透過性を保証するための重要な存在である．HA は，正しい Binding を保持している必要がある．Mobile IPv6 では，Binding を管理するために次のような処理を行う．

図 3.1 に，MN が移動後に行う処理の概要を示す．

MN が Home Link から Foreign Link に移動する場合を考える．MN は，Foreign Link で新しい CoA を取得する．MN は，HA に新しい CoA の情報を伝えるために，Binding Update と呼ばれるメッセージを送る．HA は，正しく Binding が登録・更新されたことを伝えるために，MN に Binding Acknowlegement(Binding Ack) メッセージを送信する．MN は Binding Ack を受信する

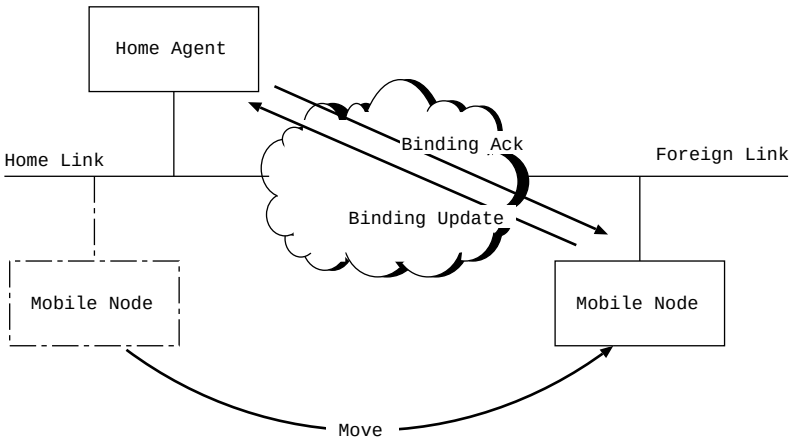

図 3.1: MN の移動後の処理

ことで，Binding の登録が完了したと判断する．Binding Ack を受信できなった場合は，Binding Update の再送等の処理を行う．

以上のようにして，HA で常に正しい Binding を保持できるようにしている．次に，Binding 登録処理後の HA の役割について述べる．

図 3.2 に，Binding 登録処理後の HA の役割について示す．

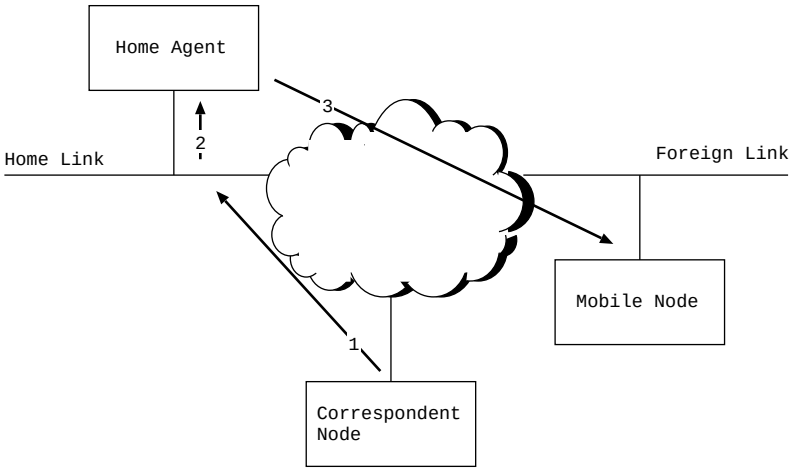

図 3.2: Binding 登録処理後の Home Agent の役割

CN が MN の Home Address に宛てたパケットを送信した場合を考える．この場合，以下のようにパケットが MN に配送される．

- MN の Home Address に宛てられた IPv6 パケットは，通常の IP routing のメカニズムに従って，Home Link に配送される．
- Home Link に配送されたパケットは，HA によって傍受される．
- HA は傍受したパケットを，CoA に宛てて再送する (IP in IP tunneling[9]).

このように，MN の CoA を知らない CN でも，Home Address を用いて通信することができる．

3.1.2 I/F Switch

Mobile IPv6 with multiple networking interface support (I/F Switch)[10] は，Mobile IPv6 を拡張して設計されたインターフェース切替え機構である．

I/F Switch では，利用者の要求や通信インターフェースの状況に応じて、利用するインターフェースを決定する．例えば,「無線 LAN を最優先する」という利用者の要求があっても，携帯電話しか利用できない状況であれば，システムは携帯電話を選択する．

また，決定したインターフェースを相手に知らせるために，そのインターフェースに対応する Binding を通信相手に送信する．ノードは，通信を開始時に，送信元と宛先の IP アドレスとポートを決定し，セッション層でこれを保持する．各層は，この情報を元にデータの送受信を行う．通常は，通信インタフェース毎に IP アドレスが割り当てられている．送信元アドレスを決定することは，その通信において利用するインターフェースを選択することになる．したがって，Mobile IPv6 では，CoA を切替えることはインターフェースを切替えることを意味する．

本研究では，インターフェース切替え機構として，I/F Switch を採用する．I/F Switch を利用すると，より安定したインターネット接続性が実現できる．Mobile IPv6 を拡張して設計されているため，Mobile IPv6 との親和性も高い．I/F Switch は，Mobile IPv6 を拡張して設計されているため，個体ノードに移動透過性を保証することを目的としている．自動車や電車のようなノード集合体への移動透過性保証は実現されない．

3.1.3 ネットワークの移動透保証機構

ネットワークの移動透過性保証機構として，Mobile Networks Support in Mobile IPv6(Mobile Subnet)[11] や Mobile Router Support with Mobile IP(Mobile Router)[12] がある．これらは Mobile IPv6 を拡張したプロトコルである．それぞれについて，以下に概説する．

Mobile Subnet

Mobile Subnet では，ネットワークアドレスと CoA を対応づけることでネットワークの移動透過性を実現する．Mobile IPv6 の Binding にネットワークアドレスを付加することで，通信相手はネットワークアドレスと CoA を対応づけることができる．

図 3.3 に，Mobile Subnet の概要を示す．図中の Internal Link は内部ネットワーク，internal node は内部のノードを表している．

Mobile Node は，内部ネットワークのネットワークアドレスを含めた Bidning を送信する．Home Agent が内部ノードにパケットを送信する場合は，内部ネットワークに対応する Binding を参照する．そして，Rouring Header を利用し，CoA を経由するように送信する．

Mobile Subnet を利用すれば，ノード集合体への移動透過性が実現できる．内部ノードに対して拡張を必要としないため，センサノードでも利用できる．しかし，Mobile Subnet だけでは通信エリアや帯域の問題を解決できない．

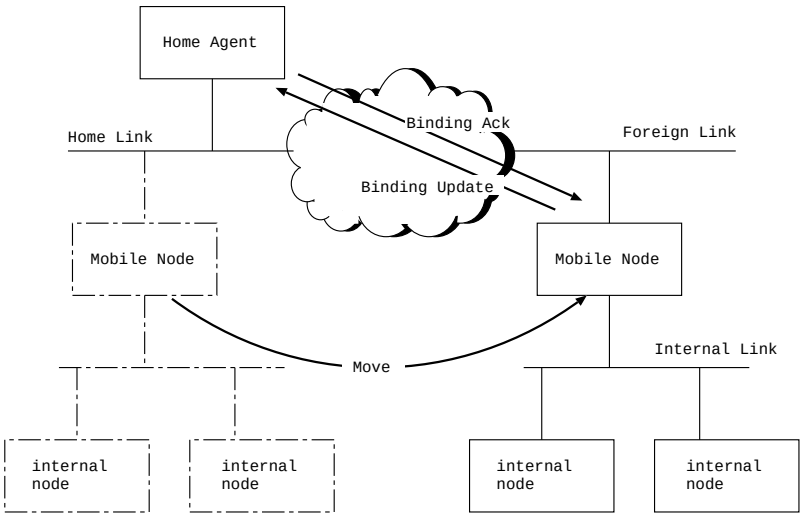

図 3.3: Mobile Subnet の概要

Mobile Router

Mobile Router Support with Mobile IP(Mobile Router)[12] は，Mobile Subnet とは異なり，Mobile IPv6 の機構に変更を加えることなくネットワークの移動透過性を保証する機構である．

Mobile Router とは，内部ネットワークをもつ Mobile Node である．Home Agent と Mobile Router 間に IP tunnel を設置する．Mobile Router がネットワークを移動した際は，変更後の IP アドレスを用いて IP tunnel が維持される．これにより，Mobile Router がどのネットワークに接続されていても，Home Agent と 1 ホップの関係を保つことができる．これにより，Mobile Router 内部のネットワークの移動透過性が保証される．

Mobile Router を利用することで，ネットワークの移動透過性を保証できる．しかし，常に Home Agent 経由の通信になり，経路が冗長である．

3.1.4 Mobile Ad-hoc Network

Mobile Ad-hoc Network(MANET)[13] は，IETF の「Mobile Ad-hoc Networks」ワーキンググループ (MANET WG) で議論され，標準化が行われている．

MANET とは，無線リンクで繋がったルータ同士が，動的にそのトポロジを変更，形成する自律システムである．無線リンクを利用しているため，ルータは自由に移動し，ルータ間の接続を随時変更する．したがって，ネットワークのトポロジは頻繁に変更される．MANET WG では，MANET 内部のルーティングを解決することを目的している．これまでの成果として，Ad Hoc on Demand Distance Vector Routing(AODV)[14] や The Dynamic Source Rouing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)[15] 等が提案されている．

また，MANET は，それ単独で閉じたネットワークとして利用する場合もあるが，インターネットに接続されることもある．例えば，Global Connectivity for IPv6 Mobile Ad Hoc Networks (GCFA)[16] が提案されている．GCFA では，外部接続性をもった Mobile IPv6 ノードが Ad Hoc Netwrok のゲートウェイをして機能する．Mobile IPv6 を利用することにより，内部の MANET は移動透過性が保証されるプロトコルである．

AODV や DSR を利用すると，自動車内に存在するノード間の経路制御が実現できる．また，GCFA を利用すると，MANET の移動透過性保証が実現される．これらにより，自動車内のノード同士での経路制御を問題を解決でき，かつノード集合体の移動透過性が実現できる．しかし，車内ノードがこれらの機構に対応している必要がある．センサノードが存在する自動車では利用できない．

3.2 考察

前述した移動透過性保証プロトコルは，ネットワーク層における移動透過性の保証を実現している．ところが，携帯電話やラップトップコンピュータといった個体のノードに移動透過性を保証することを目的としている．そのため，自動車のようなノード集合体への移動透過性保証は実現されていない．

インターフェース切替え機構は，I/F Switch が提案されている．I/F Switch は，Mobile IPv6 の拡張として設計されている．移動透過性保証プロトコルと同様に，個体のノードに移動透過性を保証することを目的としている．よって，自動車のようなノード集合体へのインターフェース切替え機能が実現されていない．

ノード集合体への移動透過性実現の技術として，Mobile Subnet や Mobile Router が提案されている．Mobile Subnet は，Mobile IPv6 の拡張として設計されている．ネットワークの移動透過性を実現している．

このように，ノード集合体が移動することに起因する問題がいくつか存在する．また，それぞれの問題に対しての解決策が提案されている．表 3.1 に，インターネット自動車の通信システムに求められる事項と既存の技術の関係を示す．

表 3.1: 要求事項と解決している問題

	a	b	c	d	e	f
Mobile IPv6	×	○	×	×	×	×
Mobile Subnet	○	○	○	○	×	×
Mobile Router	○	○	○	○	×	×
I/F Switch	×	×	×	×	○	○
GCFA	○	○	×	×	×	×

a 各ノードが一意の IP アドレスを用いて到達可能

b 移動してもセッションが維持可能

c 車内ノードに新しい機構が不要

d 限られた通信インターフェースしか備えないノードでも通信可能

e 帯域の確保

f 常時接続

表 3.1 から分かるように，個別の機構だけでは，通信システムへの要求事項すべてを解決できな

い．例えば，Mobile Subnet 単体では，通信エリアや帯域が制限される問題が解決できない．したがって，すべての要求事項を満たす通信システムの実現が重要となる．

第4章　車載ルータシステム設計

本章では，第2章で提案したCINGモデルに従って，車載ルータシステムを設計する．既存研究では，ホストの移動透過性を保証するMobile IPv6やノード集合体の移動透過性を保証するMobile Subnet，インターフェース切替えを実現するI/F Switchが提案されている．これらの機構単体では自動車をインターネットに接続する際に起こるすべての問題を解決できないことは，第3章で示した．本研究では，これらの機構を統合的に扱えるシステムを設計し，構築する．

4.1　車載ルータシステム

インターネット自動車には，移動透過性を保証機能を必要とするノードが多く存在する．また，複数のインターフェースを状況に応じて切替えることで，より安定したインターネット接続性を提供する．

車内ノードへの移動透過性の実現，より安定したインターネット接続性の提供するために，CINGモデルに沿って，車載ルータシステムを設計する．本研究では，車載ルータシステムにおける代表ノードを車載ルータと呼ぶ．車載ルータに必要な機能は以下の通りとする．

- Mobile IPv6
  車載ルータの移動透過性を保証する．移動してもセッションを維持することが可能にする．Mobile IPv6は，既存のIPv6スタックへの変更が最小限になるように設計されている．また，実装が多く公開されているため，開発コストが低い．

- Mobile Subnet
  車内ネットワークの移動透過性を保証する．車内の各ノードへ一意のIPアドレスを用いて到達することを可能にする．移動透過性が保証されたネットワークに車内ノードが接続する．これにより，車内ノードは新たな機構を必要とせず移動透過性が保証される．Mobile Subnetは，Mobile IPv6の拡張として実現するため，Mobile IPv6との親和性が高い．Mobile Routerも同様の要求事項を満たすことができる．しかし，Mobile Routerでは，車載ルータとHome Agent間で発生する冗長経路を最適化できない．よって，本研究ではMobile Subnetを採用する．

- I/F Switch
  状況に応じて通信インターフェースを切替えることで，より安定したインターネット接続性を提供する．常時接続を実現するための通信エリアや帯域の確保を実現する．Mobile Subnet機構と同じくMobile IPv6の拡張として実現するため，Mobile Subnet機構との親和性が高い．

これらの機能を車載ルータに集中させ，統合的に扱うことで，通信システムへの要求事項を満たす．

図 4.1 は，Mobile IPv6，Mobile Subnet，I/F Switch の各機構がどのように協調動作するかを示している．図中の円筒は，データベースを表している．CoA manager は CoA 管理部，Binding manager は Binding 管理部，Option Header Processing はオプションヘッダ処理部を表している．

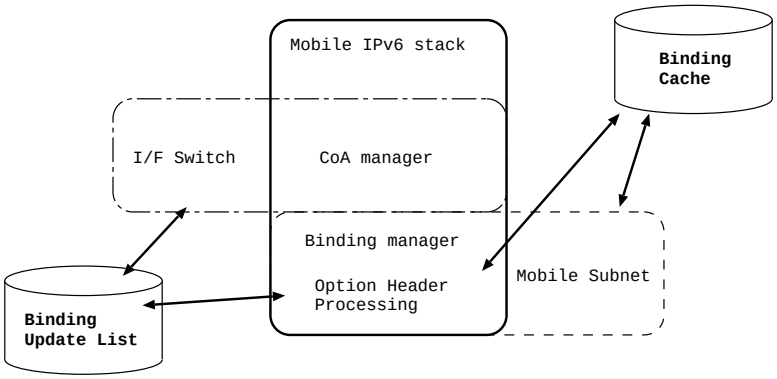

図 4.1: 各機構の協調動作

Mobile Subnet 機構は，Mobile IPv6 機構の Binding 管理部及びオプションヘッダ処理部を拡張して実現する．I/F Switch 機構は，Mobile IPv6 機構の CoA 管理部を拡張して実現する．よって，Mobile Subnet 機構と I/F Switch 機構間で Mobile IPv6 スタック上で重複する部分がない．Binding Update List を介して，Mobile Subnet 機構と I/F Switch 機構が関係をもつ．各々の協調動作部分の詳細については，第 4.1.1 節以降で述べる．

4.1.1 車載ルータシステム設計概要

図 4.2 に，車載ルータシステムの設計概要を示す．図中の I/F は，各通信インターフェースを表している．ここでは，I/F-3 は車内のネットワークを提供するために利用されているとする．楕円は，各機能を表している．円筒は，データベースを表している．

車載ルータシステムは，Mobile IPv6 の機能及び，Mobile IPv6 を拡張して Mobile Subnet 及び I/F switch 機能を持つ．車載ルータシステムの主な機能は，Home Address Selection 部，CoA Selection 部，Transparent 部からなる．車載ルータはすべての機能をもつ．HA 及び通信相手である CN は，Transparent 部のみで構成される．

Mobile IPv6

Mobile IPv6 の主な機能は，Home Address Selection 部，CoA Selection 部，Transparent 部で実現される．データベースは，経路情報を格納する Routing information，Binding を格納するデータベース，インターフェース切替えのポリシを格納する Policy Database からなる．Mobile Subnet を Transparent 部を拡張して，I/F switch を CoA Selection 部を拡張して実現する．

Home Address Selection 部では，Mobile IPv6 及び Mobile Subnet で利用する Home Address を決定する．車載ルータは，複数の Home Address を保持し，目的に応じて利用する Home Address を選択できる．Home Address を選択することは，利用する Home Agent を選択することである．Home Agent のサービスの質や，Home Agent までの RTT 等を考慮したネットワーク構成が

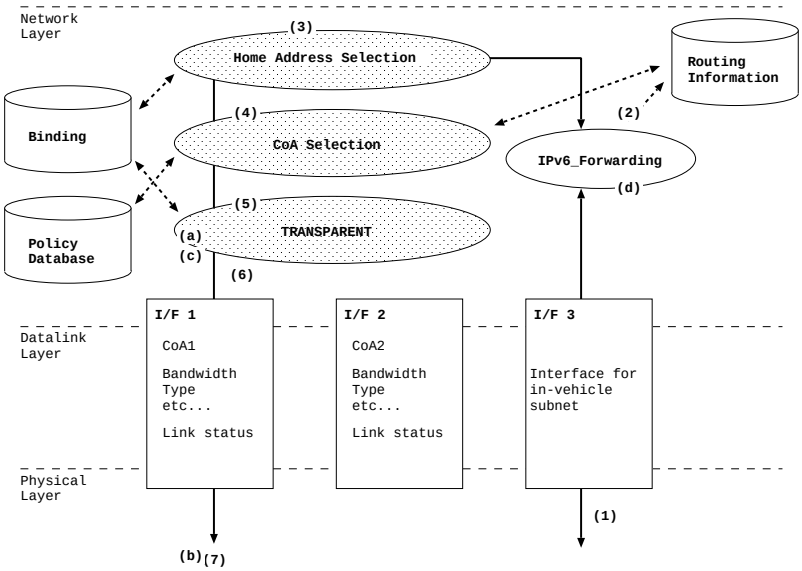

図 4.2: 車載ルータシステム設計概要

できる．Transparent 部では，Binding を参照し，Mobile IPv6 のオプション処理等を行う．CoA Selection 部では，ポリシデーターベースやインターフェースの状態を参照し，状況に応じた CoA を選択する．この部分で，インターフェース切替え機能を実現する．

Mobile Subnet

Transparent 部を拡張して，ネットワークの移動透過性保証機能を実現する．詳細については，第 4.2 節で説明する．

I/F Switch

CoA Selection 部を拡張して，インターフェース切替え機能を実現する．詳細については，第 4.3 節で説明する．

4.1.2 車載ルータシステム動作概要

車内ノードからパケットが車載ルータを経由して配送されるまでの流れを示す．

1. 車内ノードからのパケットを I/F-3 で受け取る．
2. IPv6 Forwarding 部にて，仮の宛先に対するネクストホップを決定する．
3. Home Address selection 部にて，利用する Home Address を決定する．
4. CoA Selection 部にて，インターフェースの特性やリンクの状況に応じて，利用する CoA を決定する．この場合，CoA1 が選択されたとする．

5. Transparent 部にて，移動透過性を保証するため処理を行う．オプションヘッダの挿入等が行われる．

6. 経路情報からネクストホップが選択される．I/F-1 を経由して配送される．

7. 車内ノードはパケットを受け取る．必要に応じて Binding を更新する．

次に，通信相手から車内ノードにパケットが配送されるまでの流れを示す．

a. 通信相手の Transparent 部にて，移動透過性を保証するため処理を行う．オプションヘッダの挿入等が行われる．

b. Routing Header を利用して，車載ルータの I/F-1 にパケットが配送される．

c. 車載ルータの Transparent 部にて，オプションヘッダの処理が行われる．

d. 経路情報からネクストホップが選択される．I/F-3 を経由して，車内ノードの配送される．

4.2 Mobile Subnet 概要

Mobile Subnet の設計について述べる．Mobile Subnet は，Mobile IPv6 の Binding を拡張して設計する．本システムの Transparent 部として構成される．

図 4.3 は，Mobile Sunbet 機構の概要をインターネット自動車システムに当てはめたものである．図中の in-vehicle subnet prefix は自動車内のネットワークを指す．

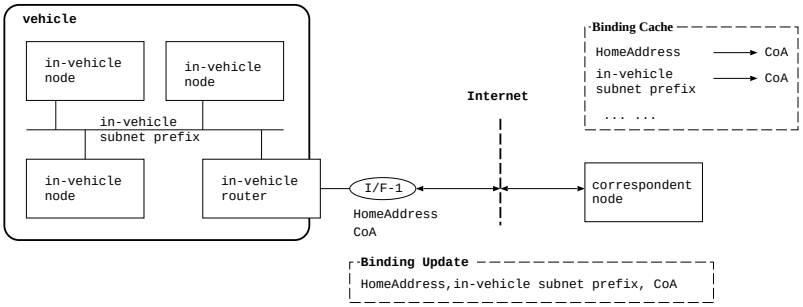

図 4.3: Mobile Subnet 機構

車載ルータは，Binding Update として，車載ルータ自身の Home Address と CoA に加え，車内ネットワークプレフィックスを付加する．これにより，通信相手は車内ネットワークに対応する CoA を知ることができる．通信相手の Binding Cache は，図中「Binding Cache」のように構成される．Mobile IPv6 では，Binding は Home Address と CoA の対応であるが，Mobile Subnet では，Network Address と CoA の対応も管理する．Binding を検索する場合は，ネットワークプレフィックスの対応を検索する．

車内ノードが通信相手にパケットを送信する場合は，以下のような流れになる．

1. 送信元アドレスは車内ノードのアドレス，宛先アドレスは通信相手のアドレスであるパケットが車載ルータに配送される．

2. 車載ルータは，受け取ったパケットをカプセル化する (IP tunneling)．カプセル化されたパケットの送信元アドレスは車載ルータの CoA，宛先アドレスは通信相手のアドレスである．

3. 経路制御に従い，カプセル化されたパケットは通信相手に配送される．

4. 通信相手は，カプセル化されたパケットから，元のパケットを取り出す．

通信相手が車内ノードにパケットを送信する場合は，以下のような流れになる．

1. 通信相手は対応する Binding を調べる．

2. 送信元アドレスが通信相手のアドレス，宛先アドレスが対応する CoA，Routing header に車内ノードのアドレスであるパケットを送信する．

3. 経路制御に従い，車載ルータにパケットが配送される．

4. 車載ルータは，Rouing header から車内ノードのアドレスを取り出し，宛先アドレスに書き換える．

5. 車内ノードは，送信元アドレスが通信相手のアドレス，宛先アドレスが車内ノードのアドレスを受け取る．

また，車内ネットワークに繋がるノードが自動設定できるようにルータ広告を行う．ルータ広告には，自動設定に必要な情報が含まれている．車内ノードは，ルータ広告から得られる情報を基にアドレスや経路情報等を設定する．

Mobile IPv6 に対して行なう拡張は以下の通りである．

車載ルータは，Binding Update に車内ネットワークの情報を付加する機構を持つ．また，ルータ広告を行う．通信ノードは，拡張された Binding Update を理解し，in-vehicle subnet prefix も検索可能な Binding Cache 機構を持つ．車内ノードは，通常の IP スタックのままでよい．

4.3 I/F Switch 概要

I/F Switch は，本システムの CoA Selection 部として構成される．

図 4.4 は，I/F Switch の概要をインターネット自動車システムに当てはめたものである．車載ルータは複数の通信インターフェースを持ち，それぞれに CoA をもつ．

車載ルータがインターフェースを切替えたい場合は，切替えたいインターフェースの CoA を Binding に利用する．例えば，I/F-1 から I/F-3 へ切替えたい場合は，Binding の CoA を CoA1 から CoA3 に変更する．通信ノードにおける Binding Cache は，次のようになる (表 4.1)．

新しい Binding Update を受け取った通信相手は，CoA1 に宛てていたパケットを CoA3 に宛てるようになる．これにより，車載ルータは，違うインターフェースからパケットを受け取ることができる．

次に，CoA 決定部の設計について述べる．図 4.5 は，CoA 決定部の概要を表している．

CoA list managemet 部に，利用するインターフェース名とそのインターフェースの優先度を入力する．また，CoA list manegemet 部はインターフェースの状態を監視する．CoA list manegement 部はこれらの情報から CoA list を構成する．

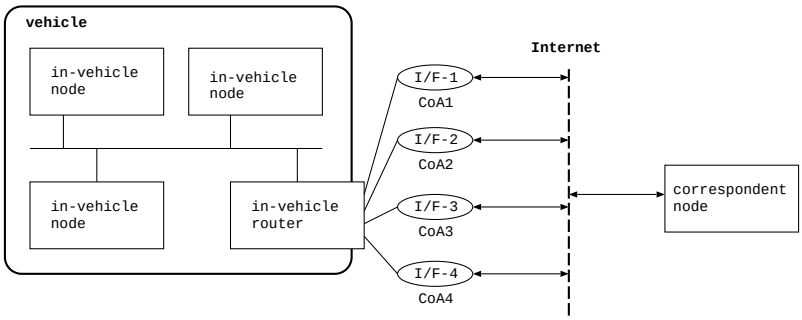

図 4.4: I/F switch 概要

表 4.1: 通信ノードの Binding Cache

Binding Cache 1	
HomeAddress	CoA1
In-vehicle subnet prefix	CoA1

Binding Cache 2	
HomeAddress	CoA3
In-vehicle subnet prefix	CoA3

例えば，図のようにインターフェースの利用ポリシが設定されているとする．I/F-2 が利用不可能な状態になったことを検知して，図のように CoA リストが構成される．構成後は，最も優先度が高い CoA2 が利用する CoA として選択される．

Mobile IPv6 に対して行なう拡張は以下の通りである．

車載ルータは，インターフェースの状態や利用者のポリシに従って使用する CoA を選択する機構を持つ．また，その情報を Binding Update として通信相手に知らせる機構を持つ．通信ノードは，通常の Mobile IPv6 スタックのままでよい．車内ノードは，通常の IP スタックのままでよい．

4.3.1 default route と NDP cache の関係

通信インターフェースを切替える際に，車載ルータの経路情報に注意を払う必要がある．

例えば，図 4.4 で，CoA1 を利用していたとする．default router は，CoA1 に対応する defrouter1 に設定されている．インターフェース切替えを行い，新たに CoA2 の利用を決定する．CoA2 に対応する default router は defrouter2 とする．この時，CoA2 を利用してパケットを配送する．しかし，経路表の default router には変更がないため，次ホップとして defrouter1 が選択される．経路表の default router を変更するためには，明示的に変更する必要がある．結果として CoA1 にインターフェースから配送されることになり，インターフェース切替えが実現できない．

この問題を解決するために，車載ルータシステムでは，新しく CoA を選択した場合に次のような動作をする．

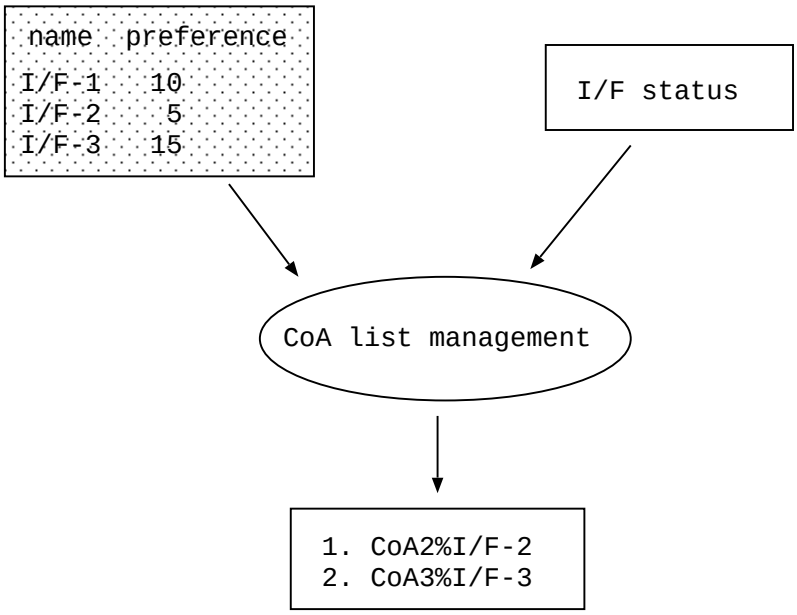

図 4.5: CoA 決定部概要

- default router をリセットする.
- 選択された CoA に対応するルータを default router にセットする.

4.3.2 IPv4 リンク上での IPv6 を用いた通信

携帯電話や PHS は，プロバイダが IPv6 に対応していないため，IPv4 のみのサービスとなる．これらのインターフェースを利用して，IPv6 ネットワークを利用するために IPv6 over IPv4 トンネル技術を使う．

IPv6 over IPv4 トンネル技術を利用するために，車載ルータシステムは次のような動作をする．

- 携帯電話などを利用してダイアルアップする.
- IPv4 アドレスが割り当てられる.
- 割り当てられた IPv4 アドレスをトンネルの相手に知らせる.
- IPv6 over IPv4 トンネルの設定を両端で行なう.

第5章　車載ルータシステム実装

本章では，車載ルータシステムの実装について述べる．本システムは，インターネットITSプロジェクトにおける高機能実験車の通信システムとして実装した．

5.1　実装環境

車載ルータシステムは，インターネットITSプロジェクトの高機能実験車システムとして実装した．

車載ルータシステムは，BSD系のオペレーティングシステムである，NetBSD[17] 1.5.2-RELEASE, FreeBSD[18] 4.2-RELEASEに実装した．これらのオペレーティングシステムには，KAMEプロジェクト[19]によるIPv6スタックのコードが含まれている．このプロトコルスタックを拡張して，車載ルータシステムを実装した．車載ルータに用意される通信インターフェースは，IEEE802.11b(無線LAN), AirH"(PHS), P-in(携帯電話，PHS), PacketOne(携帯電話), MobileArk(携帯電話), Ethernet である．

図5.1は，インターネットITSプロジェクトにおける高機能実験車システムのネットワーク構成を表している．

図中の車載ルータ，及び車内ノードと直接通信するすべてのノードを実装した．

5.2　車載ルータシステム実装概要

車載ルータシステムの実装方式として，Bump In The Stack(BITS)方式とNative Implementation(NI)方式がある．

BITS方式では，IPv6スタックとは別に車載ルータシステムのスタックを独自に構築する方式である．既存のIPv6スタックに対して変更を加えることなく，ユーザアプリケーションレベルで実装することが可能である．しかし，車載ルータシステムでは，IPv6のオプションヘッダを利用するなど，IPv6スタックでの処理を多く含む．よって，BITS方式での実装は，非常に困難であり，システムのオーバーヘッドが大きくなるため好ましくない．

NI方式では，IPv6スタック内に車載ルータシステムを実装する．Mobile IPv6やMobile Subnet機構は，その仕様上，IPv6スタックと非常に密接な関係にある．例えば，IPv6スタックの経路決定やパケットの送受信，及びIPv6オプションヘッダの処理などを変更，追加する必要がある．車載ルータシステムは，NI方式で設計する．

図5.2は，車載ルータシステムのIPスタック処理の全体図である．option_processは拡張オプション処理部，binding_update_manageはBiding Update管理部，binding_cache_manageはBinding Cache管理部，を表している．斜線で囲まれた部分が，車載ルータシステムで拡張された部分である．

車載ルータシステムでは，IPv6のオプションヘッダを用いて大半の処理が行われる．そのため，

図 5.1: 高機能実験車ネットワーク構成 (出典：インターネット ITS 会議資料)

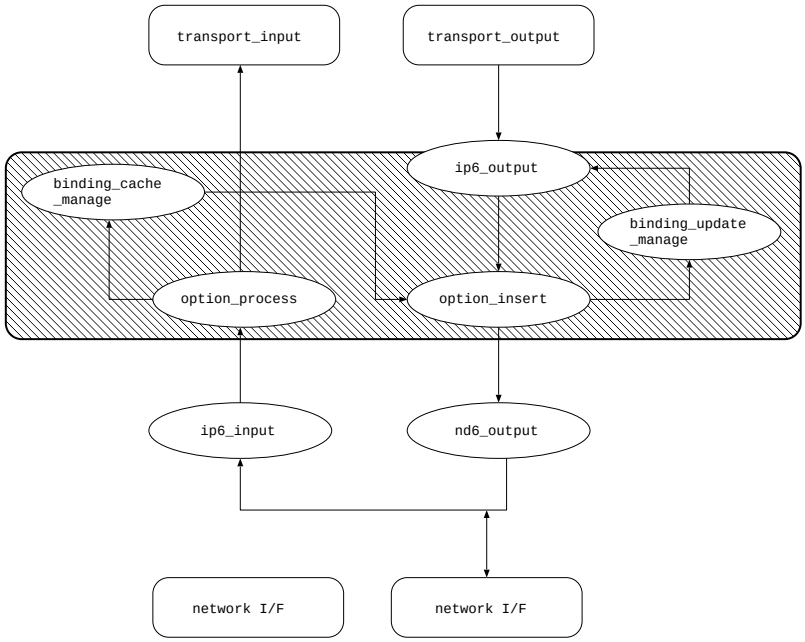

図 5.2: 車載ルータの実装概要

IPv6 スタックの送受信処理のなかで新しく機構を追加することで，車載ルータシステムを実現する．

新しく追加した機能は，以下の通りである．

- 拡張オプションの処理部
  送信時は，Mobile IPv6 及び Mobile Subnet 機構, インターフェース切替え機構のためのオプションヘッダの挿入を行う．また，受信時には，オプションヘッダの処理を行う．必要に応じて，Binding Cache 管理部や Binding Update 管理部を呼び出す．

- Binding Update 管理部
  Binding Update の取得，追加，削除，更新を行う．

- Binding Cache 管理部
  Binding の取得，追加，削除，更新を行う．

5.2.1 拡張オプション処理の流れ

拡張オプションを処理するため，IPv6 宛先オプションヘッダ処理の dest6_input 関数に拡張を行なった．この拡張を図 5.3 に示す．

Binding Update 及び Binding Ack，Binding Request の宛先オプションが検知された場合に，mobileip6_process_destopt 関数が呼び出される．mobileip6_process_destopt 関数は，それぞれのオプションに対して，recv_binding_update 関数，及び recv_binding_ack 関数，recv_binding_req 関数を呼び出す．recv_binding_update 関数では，Mobile IPv6 の仕様に従って，受けとった Binding Update を正当性を検証する．また，必要に応じて Binding Cache を追加，更新する．recv_binding_ack 関数では，Mobile IPv6 の仕様に従って，受けとった Binding Ack を正当性を検証する．また，必

```
int
dest6_input(mp, offp, proto)
        struct mbuf **mp;
        int *offp, proto;
{
  --- skip ----
#ifdef MOBILEIP6
  case IP6OPT_BINDING_UPDATE:
  case IP6OPT_BINDING_ACK:
  case IP6OPT_BINDING_REQ:
  if (mobileip6_process_destopt(m, dstopts, opt, dstoptlen) == -1) {
    printf("debug: goto bad");
    goto bad;
  }

  optlen = *(opt + 1) + 2;
  break;
#endif /* MOBILEIP6 */
  --- skip ----
}
```

図 5.3: 宛先オプションヘッダ処理関数への拡張

要に応じて Binding Update List を追加，更新する．recv_binding_req 関数では，Mobile IPv6 の仕様に従って，受けとった Binding Request を正当性を検証する．また，必要に応じて Binding Update を送信する．

5.2.2 Binding Update List 管理部

Binding Update List は，再帰的に呼び出される timeout_binding_update_list 関数を用いて繰り返し処理が行なわれる．timeout_binding_update_list 関数では，以下のような機能が行なわれる．

- Binding Update List の作成する．
  新しい Home Address を検知して，Binding Update List を作成する．
- Binding Update List のタイマ処理
  Binding Update List 内のエントリに対するタイマ処理．場合によっては Binding Update の送信や，エントリの削除を行なう．

5.2.3 Binding Cache 管理部

Binding Cache は，再帰的に呼び出される timeout_binding_cache 関数を用いて繰り返し処理が行なわれる．timeout_binding_cache 関数では，Binding Cache のタイマ処理が行なわれる．場合

によっては，Binding Request の送信したり，エントリの削除を行なう．

5.2.4 Home Address の格納方法

車載ルータシステムでは，Home Address は仮想デバイスを用いて格納する．Home Link 以外のネットワークに接続している場合は，実インターフェースには CoA が割り当てられる．割り当てられている IP アドレスと関係のない Home Address が実インターフェースに格納されている状態は，NDP の機構や経路情報管理機構上，望ましくない．よって，Home Address を格納するための仮想デバイスを用意する．

5.3 車載ルータシステムが保持すべきデータ及びそのデータ構造

車載ルータでは，Mobile Subnet や I/F switch を実現するために，多くのデータ構造を保持する必要がある．

図 5.4 に，車載ルータシステムのデータ構造を示す．図中の文字は，構造体とその名称を表している．矢印は，構造体の繋がりを表している．

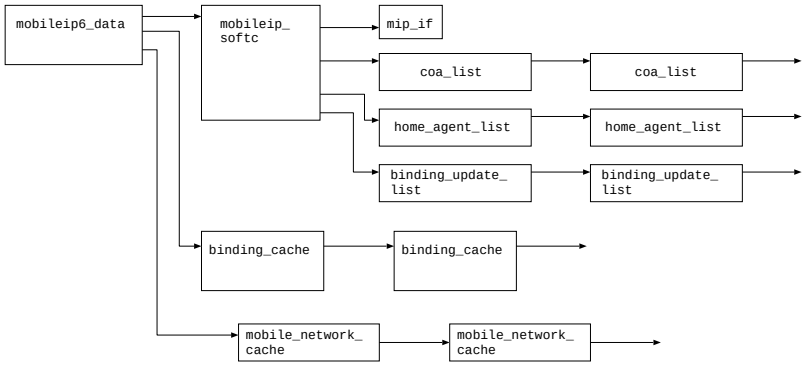

図 5.4: 車載ルータのデータ構造

- mobileip_data 構造体は，車載ルータシステムのデータ全体を格納する．
- mobileip_softc 構造体は，車載ルータに必要な情報を格納する．
- mip_if 構造体は，Home Address を格納する仮想デバイスの情報を格納する．
- coa_list 構造体は，CoA selection 部によって構成される CoA のリストを格納する．
- home_agent_list 構造体は，利用可能な Home Agent のリストである．
- binding_update_list 構造体は，送信済みの Binding Update を格納するリストである．
- binding_cache 構造体は，Binding Cache を格納したリストで，すべてのノードが保持する．
- mobile_network_cache 構造体，Subnet の Binding Cache を格納したリストで，すべてのノードが保持する．Mobile IPv6 の機能と Mobile Subnet の機能の切り分けを明確にするために，別の Cache として保持する．

また，図 5.5 は，車載ルータの CoA と Binding を管理するためのデータ構造である．

```
struct mobileip_softc {
        struct ifnet mip_if;

        struct sockaddr_in6 coa;
        struct in6_addr home_agent;

        LIST_HEAD coal_head;
        LIST_HEAD hal_head;
        LIST_HEAD bul_head;

        const struct encaptab *encap_cookie;
};
```

図 5.5: mobileip_softc 構造体

mip_if 構造体は，仮想インターフェースの情報が格納される．coa 構造体は，現在一番優先度が高い CoA が格納される．home_agent 構造体は，現在一番優先度が高い Home Agent が格納される．coal_head 構造体は，CoA リストのヘッダポインタである．hal_head 構造体は，Home Agnet リストのヘッダポインタである．bul_head 構造体は，Binding Update リストのヘッダポインタである．ecap_cookie 構造体は，カプセル化されたパケットを取り出す際に利用する情報である．

5.4 車載ルータシステム制御機構

図 5.6 は，利用者や管理者が利用する車載ルータシステムの制御機構を表している．動的な情報を管理するために，ioctl を用いる．静的な情報の管理，統計情報の取得するために，sysctl を用いる．

現在 ioctl を用いて行える処理は，以下の通りである．

- Binding Update リストの追加，削除，取得
- 実インターフェースと Home Adderss との関連づけ
- Home Agnet リストの追加，削除，取得
- Binding Cache の追加，削除，取得
- Mobile Network Cache の追加，削除，取得

管理者は，アドレスファミリが AF_INET6 の RAW ソケットをオープンした後に，ioctl を用いてこれらの制御が行える．今後，必要に応じて制御コマンドを追加する．

sysctl を用いて取得できる統計情報は，Binding 処理が成功した回数，Binding 処理が失敗した回数である．sysctl を用いて設定できる情報は，以下の通りである．

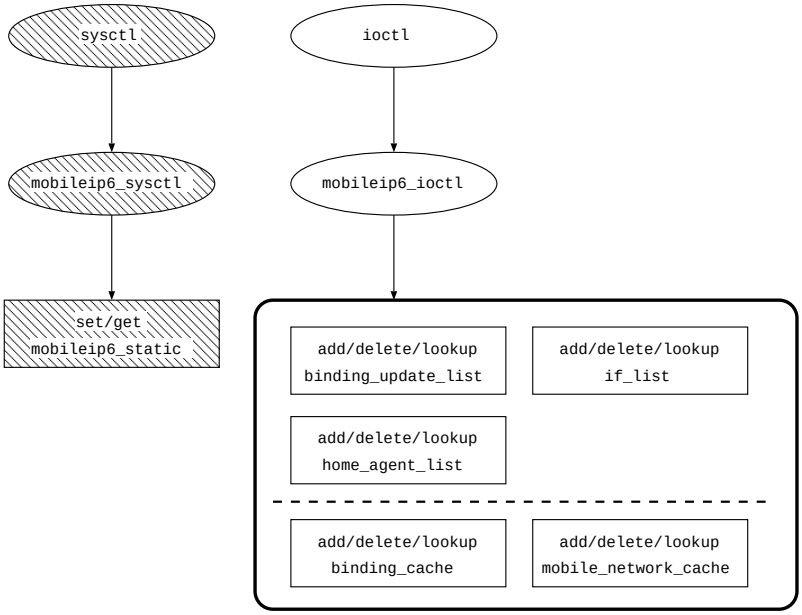

図 5.6: 車載ルータの制御機構

- Mobile Subnet 機能の on/off
- デバックメッセージの on/off
- Binding Cache を管理するルーチンが呼び出される頻度
- Binding Update リストを管理するルーチンが呼び出される頻度
- Binding Update の最大再送回数
- Binding Update の最大生存時間
- Binding Update の更新時間

管理者は，`sysctl` コマンドを利用して，これらの情報を取得，更新できる．今後，必要に応じて統計情報，設定情報を追加する．

5.5 インターフェース切替えに関連する追加機能

5.5.1 default router 管理機構の改変

KAME の IPv6 スタックでは，default router の管理を行っている．ルータ広告を受信した際に，default router がオンリンクであるかどうかを確認するように実装されている．通常のルータでは，ルータ広告を受信することがないので，この確認は行われない．しかし，車載ルータは車内ネットワークを提供しているインターフェース以外のインターフェースでは，通常のノードと同じようにルータ広告を受信する．したがって，以下のような問題が発生する．

1. ルータ広告を受信する．

2. 受信したルータ広告に関する処理を行う．IP アドレスの更新など．

3. その他のインターフェースにおける default router のオンリンク確認を行う．

4. 車内のネットワークと提供しているインターフェースでは，ルータ自身が default router である．しかし，自分自身からのオンリンク確認には応答しないように実装されている．

5. 結果として，ルータ自身を不適切な default router と判断する．車内ネットワークの経路が削除される．

この問題を解決するために，車内ネットワークを提供しているインターフェースでは default router のオンリンク確認を行わないように実装した．

5.5.2 default router の更新

インターフェースを切替えた際に，経路表の default router を更新しなくてはならい．新しく CoA が選択された際に，default router をリセットする．また，選択された CoA に対応する default router をセットする．図 5.7 は，CoA リストを管理する関数の default router 更新する部分である．

5.6 IPv4 リンク上での IPv6 を用いた通信

IPv6 over IPv4 トンネル技術を利用するために，車載ルータシステムでは，Dynamic Tunnel Configratioin Protocol(DTCP) を利用した．DTCP は，自動で IP トンネルを設定するためのプロトコルである．DTCP の実装は，KAME の dtcp プログラムを利用した．

dtcp プログラムの標準の機能としてアドレスの自動設定がある．しかし，本システムでは，この機能を利用しない．IP アドレスの自動設定をするために，DTCP を利用して設定されたトンネル上でルータ広告を流す．これは，default router の管理を NDP の default router list を利用するためである．インターフェース切替えで利用するすべてのインターフェースは，ルータ広告によって設定されている必要がある．

```
dr = TAILQ_FIRST(&nd_defrouter);
while (dr) {          /* すべての default roter 毎に */
  struct nd_defrouter *t;
  t = TAILQ_NEXT(dr, dr_entry);

  {
    ifp = dr->ifp;

    for (ifa = ifp->if_addrlist.tqh_first; ifa; ifa = ifa->ifa_list.tqe
    _next)
    /* default router に対応するすべてのアドレス毎に */
    {
      if (ifa->ifa_addr->sa_family != AF_INET6)
      continue;

      tmpsin6 = (struct sockaddr_in6 *)ifa->ifa_addr;

      if (!IN6_IS_GLOBAL(&tmpsin6->sin6_addr))
        continue;

      if (IN6_ARE_ADDR_EQUAL(&tmpsin6->sin6_addr, pcoa)) {
      /* 選択された CoA と同じ場合 */
        MIPBUG(("try to change Default Router\n"));
        defrouter_reset();          /* default router をリセットする */
        defrouter_addreq(dr);       /* セットする */
      }
    }

  }

  dr = t;
}
```

図 5.7: default router の更新

第6章　車載ルータシステム評価

本章では，車載ルータシステムの評価について述べる．本システムの評価として，インターネットITSプロジェクトにおける高機能実験車としての実証実験，本システムの有効性を示す定性的評価，実際の通信における定量的評価を行う．

6.1　定性的評価

車載ルータシステムが有効であったことを示すために，動作確認を行った．車載ルータシステムは，インターネットITSプロジェクトの高機能実験車として実装した．インターネットITSプロジェクトの高機能実験車を用いて動作確認を行った．

6.1.1　実験環境

実験環境は，第5章で示した図5.1である．車載ルータは，車載ルータシステム(NetBSD 1.5.2-R)である．車載ルータは，MobileArk，PacketOne，P-in，AirH”，802.11bのインターフェースを備える．図中，慶應SFCのネットワークに通信相手(CN)を用意した．CNは，車載ルータシステム(FreeBSD 4.2-RELEASE)である．図中のHome Agent(HA)は，車載ルータシステム(FreeBSD 4.2-RELEASE)である．車内ノードは，車載サーバ(Linux)，車載Subサーバ(Linux)，PC(Windows 2000)，PC(FreeBSD)である．これらのノードは，FastEthernetを介して車載ルータに接続されている．

表6.1に，実験環境の構成をまとめたものを示す．

表 6.1: 定性的評価の実験環境

	OS	通信インターフェース
車載ルータ	NetBSD1.5.2 ＋ 車載ルータシステム	複数
通信相手	FreeBSD4.2 ＋ 車載ルータシステム	FastEthernet
車内ノード	Linux，Windows2000，FreeBSD4.4	FastEthernet

6.1.2　実験結果

まず，pingプログラムを用いて，以下の要求事項を満たしているかを確認する．pingプログラムは，ICMP Echo Request/Replyを用いて通信相手とのRTTを測定するプログラムで，通信相手との到達性を確認できる．

- 各ノードが一意のIPアドレスを用いて到達できる

- 車内ノードに新しい機構が不要
- 限られた通信インターフェースしか備えないノードでも通信可能

実験結果を以下に示す.

表 6.2 は，Mobile Subnet 機構の動作確認を行った結果である．SN は車内ノード，CN は通信相手，MN は車載ルータを表している.

表 6.2: Mobile Subnet 機構の動作確認結果

	到達性
SN と CN 間の通信	○
MN と CN 間の通信	○
SN と MN 間の通信	○

SN と CN 間で通信できること，及び MN と CN 間で通信できること，及び SN と MN 間で通信できることを確認した．よって，前述の要求事項を満たしている.

次に，無線 LAN を利用してる状態で，無線 LAN のサービスエリアからはずれた際に，携帯電話に切り替わることを確認する．また，ping プログラム及び telnet プログラムを実行し，以下の要求事項を満たしているかを確認する.

- 移動してもセッションが維持可能
- 常時接続

図 6.1 に，無線 LAN から携帯電話に切替えた際の ping プログラムの出力結果を示す.

```
PING6(56=40+8+8 bytes) 3ffe:501:100c:d220:202:2dff:fe31:d600 --> 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=0 hlim=63 time=2.713 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=1 hlim=63 time=2.606 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=2 hlim=63 time=2.584 ms
   --- skip ---
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=28 hlim=63 time=2.595 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=29 hlim=63 time=2.687 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=30 hlim=63 time=237.454 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=31 hlim=63 time=521.162 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=32 hlim=63 time=542.329 ms
   --- skip ---
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=96 hlim=63 time=517.004 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=97 hlim=63 time=537.108 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=98 hlim=63 time=537.017 ms
16 bytes from 3ffe:501:100c:d210:202:b3ff:fe41:22a8, icmp_seq=99 hlim=63 time=518.982 ms
   --- skip ---
```

図 6.1: ping 出力例

表 6.3 に，インターフェース切替え機構の動作確認を行った結果を示す.

SN と CN が通信中に，DoPa から無線 LAN，無線 LAN から AirH”，AirH ”から DoPa にインターフェースを切替えた．インターフェースを切替えてもセッションが継続されることを確認できた．MN と CN が通信中，DoPa から無線 LAN，無線 LAN から AirH”，AirH ”から DoPa に

表 6.3: インターフェース切替え動作確認結果

	DoPa から無線 LAN	無線 LAN から AirH”	AirH ” から DoPa
SN と CN が通信中	○	○	○
MN と CN が通信中	○	○	○

インターフェースを切替えた．インターフェースを切替えてもセッションが継続されることを確認できた．よって，前述の要求事項を満たしている．

6.2 定量的評価

帯域の確保，常時接続性を実現するためには，通信インターフェースの状態や特徴，及び使用目的毎にインターフェースを切替えることが有効である．しかし，インターフェースを切替える際に通信が途切れる時間が発生することが予想される．この時間を数式 6.1 に示す．

$$Binding \text{の処理時間} + \text{車載ルータと通信相手間の} RTT \tag{6.1}$$

この時間を実際の環境で測定することで，インターフェース切替え機構の実用性を検証する．また，実際にインターフェースを切替えた際に，帯域はどのように変化するかを測定する．

以下のような実験環境を構築し評価を行った．

6.2.1 実験環境

図 6.2 は，定量的評価の実験環境を表している．

図中の PDC は携帯電話，802.11b は無線 LAN(IEEE802.11b) を表している．Mobile Node は車載ルータを表していて，PentiumIII 500MHz，メモリ 192M，車載ルータシステム (NetBSD 1.5.2-R) という構成である．CN は通信相手を表していて，FastEthernet を利用してインターネットに接続されている．PentiumIII 500MHz，メモリ 256M，車載ルータシステム (FreeBSD 4.2-RELEASE) という構成である．internal node は車内ノードを表していて，FastEthernet を利用して車載ルータに接続されている．PentiumIII 500MHz，メモリ 192M，FreeBSD 4.4-RELEASE という構成である．

表 6.4 に，定量的評価の実験環境をまとめたものを示す．

表 6.4: 定量的評価の実験環境

	OS	通信インターフェース
車載ルータ	NetBSD1.5.2 + 車載ルータシステム	無線 LAN，DoPa
通信相手	FreeBSD4.2 + 車載ルータシステム	FastEthernet
車内ノード	FreeBSD4.4	FastEthernet

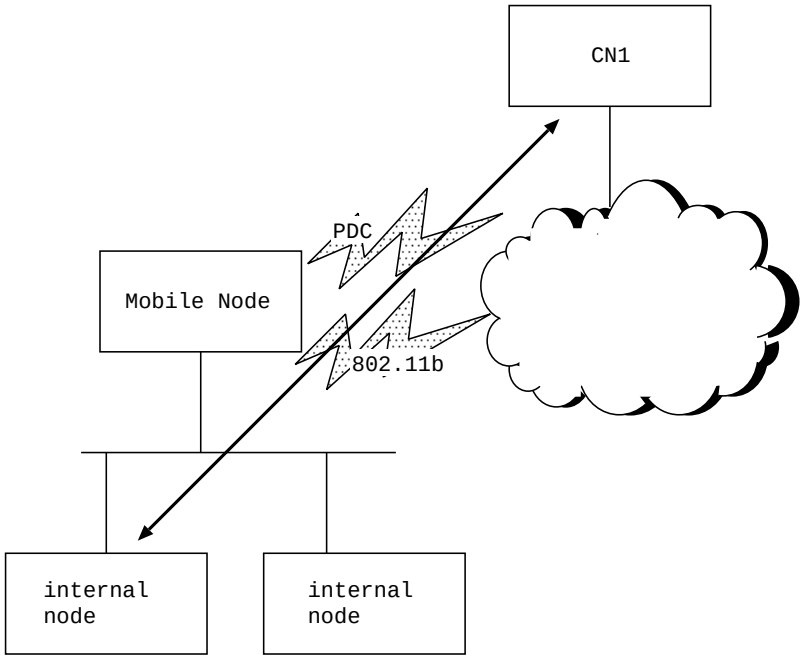

図 6.2: 定量的評価の実験環境

6.2.2 実験結果

車載ルータと CN 間の平均 Round Trinp Time(RTT) を ping プログラムを用いて測定した．測定時間は，携帯電話，無線 LAN の場合それぞれで，3600 秒間 (1 時間) である．車載ルータが携帯電話を利用している場合は，平均 RTT は 550.35ms，パケットロスは 0%であった．車載ルータが無線 LAN を利用している場合は，平均 RTT は 2.51ms，パケットロスは 0%であった．

次に，内部ノードと CN 間の RTT を ping プログラムを用いて測定した．測定時間は 1200 秒間 (20 分間) である．図 6.3 は，内部ノードと CN 間の RTT の変化を表している．x 軸は時間 (s)，y 軸は RTT(ms) を表している．車載ルータでは，無線 LAN と携帯電話間でインターフェース切替えを行っている．

最小 RTT は 2.82ms，平均 RTT は 188.82ms，最大 RTT は 1914.32ms，平均偏差 259.123ms であった．

インターフェースを切替える際に，パケットロスは発生しなかった．理由としては，RTT の短い区間で測定したことが考えられる．通常，Binding はアプリケーションデータに添付して送信される．そのため，アプリケーションデータの送信を待つためにタイムラグが発生する．とこところが，本システムでは Binding を送信する際に，アプリケーションデータの送信を待たずに，Binding 単体を送信するように実装した．このこともパケットロスが発生しなかった原因のひとつと考えられる．これらの結果から，インターフェース切替え機構は実用に耐え得ると考える．

次に，帯域の確保に関する測定を行った．帯域を測定する際に一般的に利用されている netperf プログラムを用いてインターフェース切替え時の帯域の変化を測定した．測定したのは，IPv6 の TCP ストリーミングである．図 6.4 は，インターフェース切替え時の帯域の変化を表している．x 軸は時間 (秒)，y 軸は帯域 (kbp/s) である．無線 LAN から携帯電話，携帯電話から無線 LAN，無線 LAN から携帯電話とインターフェースを切替えている様子を表している．

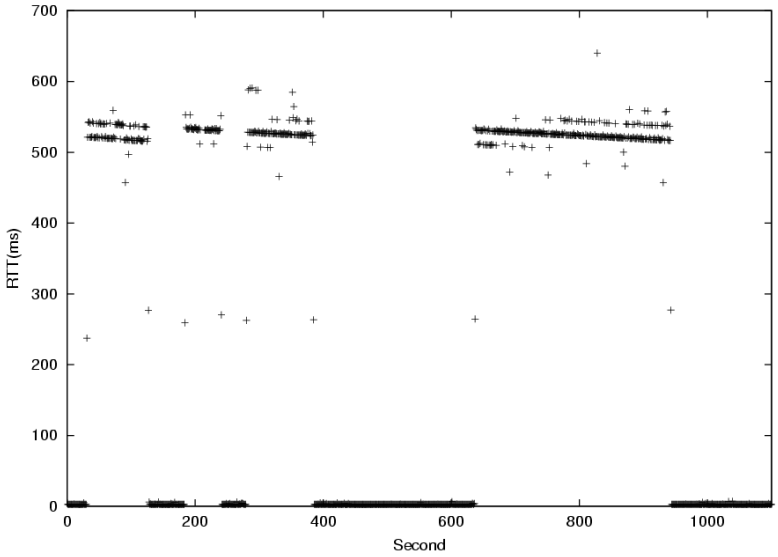

図 6.3: 車内ノードと外部ノード間の RTT

無線 LAN を使用している場合は，およそ 4,500Kbps の帯域があった．35 秒付近で携帯電話へ切替えた際に，およそ 1Kbps の帯域に絞られた．再び，70 秒付近で無線 LAN に切替える．TCP はウインドウ・サイズを徐々に拡大していくため，携帯電話に切替える前の水準 (4,500Kbps) には戻らず，3,000Kbps 前後で振れている様子が分かる．

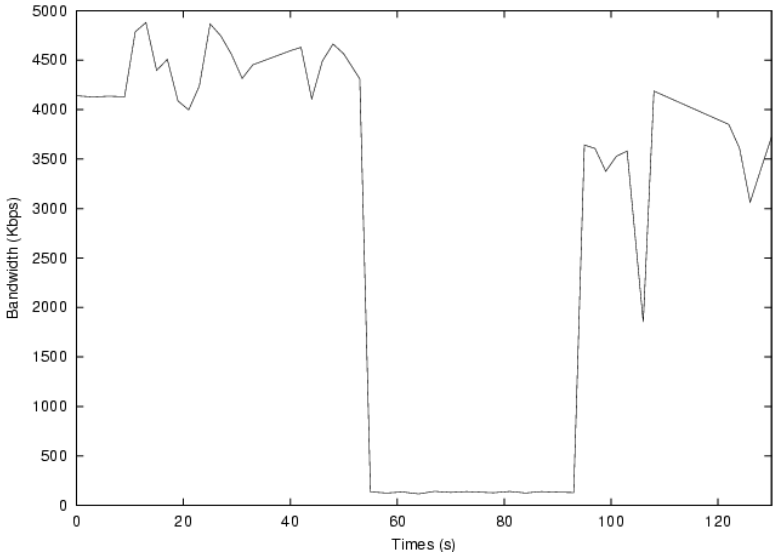
Bandwidth (Kbps)
Times (s)
5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
20
40
60
80
100
120

図 6.4: 帯域の変化

第7章　結論

7.1　まとめ

本論文では，自動車をインターネットに接続するための自動車通信システムを構築した．

自動車は，複数の計算機や複数の通信インターフェースをもつ移動体である．このような環境を支援するモデルとして，大きく分けて次の2つがあった．すべての計算機が通信インターフェースと移動透過性保証機構等を備えるモデル及び，あるノードの通信インターフェースと移動透過性保証機構等を共有するモデルである．本研究では，後者のモデルを採用し，ノード集合体の代表ノードに機能を統合させるCINGモデルを提案した．

既存研究では，ホストの移動透過性を保証するMobile IPv6やノード集合体の移動透過性を保証するMobile Subnet，インターフェース切替えを実現するI/F Switchが提案されている．これらの機構単体では，自動車をインターネットに接続する際に起こるすべての問題を解決できない．そこで，これらの機構を統合的に扱えるシステムの実現が重要であった．

車載ルータシステムは，CINGモデルに基づき，Mobile IPv6やMobile Subnet機構，インターフェース機構を統合的に扱えるシステムとして設計された．本研究では，車載ルータシステムをインターネットITSの高機能実験車として実装した．

車載ルータシステムは，ノード集合体における移動透過性，ノード集合体におけるインターフェース切替えを実現した．本システムを用いることにより，通常のIPv6スタックをもつノードの移動透過性保証，広域接続性，帯域の確保，車内ノードの自動設定の問題が解決された．

本研究により，インターネット自動車の通信基盤が構築できた．

7.2　今後の課題

新しいシステムを設定する際に，そのシステムの規模性が重要な懸案事項である．自動車は，現在世界で7億台存在し，2010年には10億台を突破すると言われている．本システムを普及させ，自動車の情報化を促進させるためには，膨大な数の自動車とその通信相手を視野にいれる必要がある．

今後の課題として，本システムを複数台の自動車で動作させた場合のシュミレーションを行い，本システムの規模性を検証する．実際に膨大な数の自動車を走行させることは不可能である．本システムを搭載した自動車をコンピュータ上で仮想的に動作させることで，システムの規模性を確認する．

また，実際の自動車を用いた実証実験を継続し，成果を公開する．実証実験を継続することで，本システムの問題点や利便性を追求する．本システムが実際に普及して一般の方が利用するためには，システムの作り込みや改良が必要である．実証実験の結果をシステムのソースコード等を公開することで，普及促進を狙う．

謝辞

本論文の作成にあたり，御指導頂きました慶應義塾大学環境情報学部教授 村井純博士，並びに政策・メディア研究科 徳田英幸博士環境情報学部教授 楠本博之博士，同学部教授 中村修博士，同学部専任講師 南政樹氏に感謝致します.

絶えず御指導と御助言を頂きましたソニー コンピュータサイエンス研究所 長健二朗氏，慶應義塾大学政策・メディア研究科プロジェクト担当教員 植原啓介氏，SFC 研究所非常勤嘱託研究員 渡辺恭人氏，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科後期博士課程 和泉順子女氏，慶應義塾大学政策・メディア研究科後期博士課程 関谷勇司氏，政策・メディア研究科後期博士課程 湧川隆次氏に感謝致します.

本研究を進めていく上で御支援下さった慶應義塾大学政策・メディア研究科修士課程 佐藤雅明氏，政策・メディア研究科修士課程 若山史郎氏，総合政策学部 小柴晋氏，環境情報学部 渡里雅史氏，並びに慶應義塾大学 徳田・村井・楠本・中村・南合同研究室 SING 研究グループ，同合同研究室 NACM 研究グループの皆様に感謝の念を表します.

参考文献

[1] M. Minagi, M. Toge, K. Ueda, and N. Mohri. The nonstop electronic toll collection system. Technical report, MWE'97 Micro, February 2001.

[2] TOYOTA MEDIA STATION INCORPORATED. *MONET*, May 2001. http://www.tms.ne.jp/.

[3] インターネット ITS プロジェクト. インターネット *ITS*, May 2001. http://www.internetits.org/.

[4] 財団法人自動車走行電子技術技術協会. *IPCar:* 自動車プローブ情報システム, May 2001. http://www.ipcar.org/.

[5] 高橋邦彦 and 村上陽志. IPCar: 自動車プローブ情報システムの構築と実証. Technical report, 情報処理学会, 情報家電コンピューティング研究グループ, May 2001.

[6] C. Perkins. *IP Mobility Support*, October 1996. RFC 2002.

[7] D. Johnson C Perkins. *Mobility Support in IPv6*, July 2001. Work in Progress, draft-ietf-mobileip-ipv6-15.txt.

[8] Fumio Teraoka, Masahiro Ishiyama, Mitsunobu Kunishi, and Atsushi Shionozaki. *LIN6: A Solution to Mobility and Multi-Homing in IPv6*, August 2001. Work in Progress, draft-teraoka-ipng-lin6-01.txt.

[9] W. Simpson. *IP in IP Tunneling*, October 1995. RFC 1853.

[10] Ryuji Wakikawa, Keisuke Uehara, and Jun Murai. Multiple Network Interface and Policy-Based Routing Support for Mobile IPv6. Technical report, Internet Engineering Task Force, February 2001.

[11] Thierry Ernst, Ludovic Bellier, Alexis Olivereau, Castelluccia Claude, and Hong-Yon Lach. *Mobile Networks Support in Mobile IPv6*, June 2001. Work in Progress, draft-ernst-mobileip-v6-network-02.txt.

[12] Timothy J. Kniveton, Jari T. Malinen, Vijay Devarapalli, and Charles E. Parkins. *Mobile Router Support with Mobile IP*, November 2001. Work in Progress, draft-kniveton-mobrtr-00.txt.

[13] S. Corson and J. Macker. *Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations*, January 1999. RFC 2501.

[14] Elizabeth Royer Santanu Das, C Perkins. *Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing*, July 2000. Work in Progress, draft-ietf-manet-aodv-06.txt.

[15] David B. Johnson, David A. Maltz, Yih-Chun Hu, and Jorjeta G. Jetcheva. *The Dynamic Source Rouing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks(DSR)*, November 2001. Work in Progress, draft-ietf-manet-dsr-06.txt.

[16] Ryuji Wakikawa, Jari T. Malinen, Carles E. Perkins, Anders Nilsson, and Antti J. Tuominen. *Global Connectivity for IPv6 Mobile Ad Hoc Networks*, November 2001. Work in Progress, draft-wakikawa-manet-globalv6-00.txt.

[17] The NetBSD Project. *NetBSD 1.5.2*, May 1994. http://www.netbsd.org/Releases/formal-1.5/NetBSD-1.5.2.html.

[18] The FreeBSD Project. *FreeBSD 4.2*, November 2000. http://www.freebsd.org/releases/4.2R/announce.html.

[19] The KAME Project. *KAME*, April 1998. http://www.kame.net/.