卒業製作 2001 年度 (平成 13 年度)

複数の移動計算機による協調通信機構の設計と実装

指導教員

徳田 英幸

村井 純

楠本 博之

中村 修

南 政樹

慶應義塾大学 総合政策学部

日野哲志

s98820th@sfc.keio.ac.jp

平成 14 年 2 月 18 日

概 要

本研究では, 移動計算機の一時的な集合において, 複数のインターネット接続性を利用する機構を実現する. 本機構により, 複数の移動計算機による協調通信機構が実現される.

今後, 自動車・電車などの交通機関内や, 駅・ホテルなどで, 複数の移動計算機が一時的な集合を形成する状況が増加する. 現状では, このような状況からインターネットとの通信を行なうため, それぞれの移動計算機が独自に接続性を持っている.

集合内の他の計算機が持つインターネット接続性を, 計算機間で共有することにより, 計算機同士がインターネット接続性を, 互いに補完することが可能である. このシステムでは, インターネット接続性が共有されているため, 内部の計算機は, 他の計算機が持つ接続性を, 仮想的に自分の接続性として扱うことが可能である.

本研究では, 複数の計算機が協調してインターネットへ接続するモデルを提案する. このモデルでは, 複数の計算機間で一時的なネットワークを構築する. インターネットへの通信インターフェイスを持つ計算機をゲートウェイとして利用する. このモデルを実現するための機構を実装した.

また, 実装したシステムを利用して, 実際に実験的なネットワークを構築し, 本機構による協調通信の実現を検証した. 同時に, 性能評価および他機構との機能比較を行い, 本モデルの優位性を示した.

本研究により, 複数の移動計算機間で協調することにより, 接続性を提供するシステムが構築できた.

キーワード

1, IPv6　2, 移動体計算機　3, 複数ゲートウェイ　4, 移動ネットワーク　5, Mobile IPv6

abstract

In this research, the system, which utilizes multiple internet connectivity in the transient mobile nodes, will be implemented. This system accomplishes the cooperative networking mechanism with multiple mobile nodes.

In near future, the situation of which the network is created by multiple mobile nodes in the place such as train-staions, hotels, and inside the transport facilities, are expected to increase. Currently, in order to have an internet connectivity in such situation, each mobile nodes has connectivity of its own.

However, it is possible to improve the networking environment by making nodes inside the set to cooperate to one another. In detail, by sharing the network connectivities of the nodes inside the set, it is possible to complement the connectivities of each other. In this system, nodes inside the set can virtually utilize the network connectivities of others as a connectivity of its own by sharing the network connectivity.

In this research, the model, which multiple nodes get connected to the internet by cooperating with each other, is proposed. In this model, a temporal network will be constructed between multiple nodes. Nodes with Internet connectivities will be used as a gateways. The system which accomplishes this model is implemented.

Additionally, by constructing the experimental network using the system implemented in this research, cooperative communication using this system is verified. By evaluating the performance and comparing the functionality with other systems, the advantages of this model is indicated.

The system, which provides network connectivity by making multiple mobile nodes to cooperate, is implemented by this research.

Keywords

1, IPv6　2, Mobile Computer　3, Multiple Gateway　4, Mobile Network　5, Mobile IPv6

目 次

第 1 章　序論 **5**
- 1.1　背景 5
- 1.2　目的 5
- 1.3　本論文の構成 6

第 2 章　現在の移動計算機環境における問題点 **7**
- 2.1　本研究で実現する移動計算機環境 7
- 2.2　協調通信機構への要件 7
- 2.3　現在行なわれている研究 8
  - 2.3.1　移動透過性・着信可能性に関する研究 9
  - 2.3.2　複数の外部接続性の利用に関する研究 10
  - 2.3.3　集合内通信に関する研究 12
- 2.4　考察 14

第 3 章　計算機協調モデルによる解決 **16**
- 3.1　ゲートウェイ管理モデル 16
- 3.2　計算機協調モデル 16
  - 3.2.1　仮想的なインターフェイスによる協調通信 16
- 3.3　本研究におけるアプローチ 17
- 3.4　本研究における用語 18

第 4 章　Multiple Gateway in Mobile Network の設計 **20**
- 4.1　移動ネットワークを利用した協調通信 20
- 4.2　現状の問題点 20
  - 4.2.1　取得可能なゲートウェイ情報 21
  - 4.2.2　ゲートウェイの選択利用 21
  - 4.2.3　ネットワークアドレス自動設定機構 22
- 4.3　MGMN 22
  - 4.3.1　移動計算機通信支援プロトコルの利用 22
  - 4.3.2　ゲートウェイに関する情報 22
  - 4.3.3　システム概要 23
  - 4.3.4　インターフェイス情報取得機構の設計 24
  - 4.3.5　ゲートウェイ情報共有機構の設計 24
  - 4.3.6　ゲートウェイ選択機構の設計 25
- 4.4　アドレス自動設定機構の設計 26

第 5 章　MGMN の実装 **27**
5.1　実装環境 27
5.2　Mobile IPv6 と複数インターフェース通信機構の利用 27
5.3　ゲートウェイ情報 27
5.4　モジュールの実装 28
5.4.1　ゲートウェイ情報共有機構の実装 28
5.4.2　ゲートウェイ選択機構の実装 30
5.5　アドレス自動設定機構の実装 31

第 6 章　評価 **33**
6.1　MGMN の定性的評価 33
6.2　MGMN の性能評価 33
6.2.1　ゲートウェイ情報共有にかかるタイムラグ 33
6.2.2　情報共有のための通信によるオーバヘッド 34
6.2.3　動的な複数ゲートウェイの利用 35

第 7 章　結論 **38**
7.1　まとめ 38
7.2　今後の課題 38

図 目 次

2.1 本研究により実現される移動計算機通信環境 8
2.2 Mobile IPv6 の仕組み 9
2.3 複数インターフェース通信機構 11
2.4 Mobile Network 概要 13

3.1 ゲートウェイ管理モデル 17
3.2 内部ネットワークによる仮想インターフェイス 18
3.3 本研究における用語 19

4.1 1 セグメントネットワークでの複数ゲートウェイ 21
4.2 モジュール関連図 24

5.1 ゲートウェイ情報構造体 28
5.2 ゲートウェイ情報送信処理 29
5.3 ゲートウェイ情報受信処理 29
5.4 ポリシ設定ファイル 30
5.5 ユーザポリシ構造体 30
5.6 プレフィクス委託要求メッセージフォーマット 31
5.7 プレフィクス委託応答メッセージフォーマット 32

6.1 ゲートウェイ情報共有のために送信されるパケット 34
6.2 ゲートウェイ情報共有によるネットワークへの負荷 35
6.3 測定環境 35
6.4 UDP と ICMP 36
6.5 TCP と UDP 37

表 目 次

2.1 既存研究の比較 14

4.1 ゲートウェイ情報 25

6.1 各処理におけるコスト 34

第1章　序論

本章では, 本研究の背景, および研究の目的について述べる. また, 本論文の構成を示す.

1.1　背景

計算機の小型化, 高性能化により, 移動しながら計算機を利用することに対する要求が高まっている. 同時に, IEEE802.11 [1] や Bluetooth [2] などの無線通信技術により, 移動中においても, インターネットへの通信を行なうことへの要求が増加している.

移動中の自動車内におけるインターネットを利用した TV 会議システムは, 多忙なビジネスマンに大きな時間の節約をもたらす. また, インターネットに接続された血圧計による, 24 時間対応可能な医療システムなどは, 高齢化社会においては, 必要不可欠なシステムとなる. このように, 移動計算機を利用したサービスに対する要求は大きい.

これらの要求にしたがい, インターネット自動車 [3] やモバイル IPv6@トレイン [4] など, 自動車や電車内のユーザに対して, インターネット接続性を提供するプロジェクトが行なわれている. 現在, インターネット自動車プロジェクトでの研究成果は, インターネット ITS [5] プロジェクトで実証実験が行なわれている. インターネット ITS では, 自動車内の各センサから情報を取得するプローブ情報システムや, 各座席に備えつけられたディスプレイを利用した, 車車間グループコミュニケーションシステムなどが自動車に搭載されている.

また, 街中でのインターネット接続性提供サービスも普及しはじめている. 日本では, Mobile Internet Service(MIS) [6] が, 実験的に公共スペースでの無線によるインターネット接続性を提供している. また, アメリカでは Boingo Wireless [7] が, アメリカ国内 400 地点での無線 LAN サービスの提供を始めている. このようなサービスの普及により, 飛行場やホテルといった地域に, 移動計算機のユーザが集合する状況が生じる.

このように, 自動車や電車内, 飛行場など, それぞれの場所に複数の移動計算機が集合する環境が増加する. しかし, 現在の移動計算機通信環境では, 集合内の計算機がそれぞれ独自にインターネットへの接続性を保持する必要がある. 電車内などで移動しながら通信を行なう場合には, 位置によって利用する通信機器を無線 LAN から携帯電話に切り替える必要がある. 通信環境の向上などを行なう場合には, 自分の持つ接続機器自体を高性能な機器に変更したり, 増加させるなどの手段をとる必要がある.

1.2　目的

本研究では, 複数の移動計算機による協調通信機構を実現する. 移動計算機は, 他の計算機が持つ通信インターフェイスを, 自分が持つ仮想的なインターフェイスのように扱うことが可能になる. 本機構により, 計算機同士で相互に通信環境の補完を行なうことが実現される.

複数計算機による協調通信を実現するため, 本研究では, Multiple Gateway in Mobile Network

(MGMN) システムの設計および実装を行なう. MGMN では, 複数の計算機による集合を, 一時的なネットワークとして捉えることにより, ネットワーク内において, 各計算機が持つ通信インターフェイスの共有を実現する.

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, 本研究において実現される移動計算機環境について述べる. また, 機能要件を整理し, それぞれに関して, 現在行なわれている研究について述べる. 第 3 章で, 2 つの解決モデルをあげ, それぞれの特徴をまとめ, 本研究で利用するネットワークモデルを提示する. 第 4 章では, そのモデルにもとづいて, 複数計算機による協調通信機構の設計を行なう. 第 5 章で本機構の具体的な実装について述べる. 第 6 章で, 実装された本機構の評価を行なう. 他機構に対する優位性の検証および, 性能評価を行うことによって, 本研究の有効性を検証する. 第 7 章において, まとめと今後の課題を挙げ, 本論文の結論とする.

第2章　現在の移動計算機環境における問題点

本章では, 本研究が実現する移動計算機環境について述べる. そして, 実現にあたり問題となる点を列挙し, その問題に関する既存研究について述べる.

2.1　本研究で実現する移動計算機環境

将来的に, PDA や携帯電話, ノート PC など, 人間を取り巻く, 様々な機器を介してインターネットを利用することが可能になる. これらの機器をインターネットに接続させることにより, 様々なサービスを享受することが可能になる. これらの機器の中には, 既にインターネットへの接続インターフェイスを持つ機器もあり, 移動しながら通信を行なうことが可能である. 現在は, それらの機器は個別に無線通信インターフェイスを搭載し, 機器ごとに独立してインターネットに接続している.

本研究では, 自動車内や Personal Area Network 内など, 将来的に IP 通信インフラストラクチャが整備されるであろう環境を想定する. たとえば, 自動車内の各座席には, Ethernet のインターフェイスが用意されており, 座席間での通信が行なえる. また, Personal Area Network では, Bluetooth などの近距離通信デバイスの利用により, 近距離通信が実現される.

このような環境においては, ユーザの持つ計算機全てが, インターネットへの接続性, つまりグローバルコネクティビティを持つ必要はない. 例えば, 3 人で自動車に搭乗した時, 2 人が携帯電話や PHS によるグローバルコネクティビティを持っており, 1 人が無線通信機器を持たない状況がある. 自動車内に, IP 通信インフラストラクチャが整備されている場合, これら 3 人の持つ移動計算機で, 自動車内部にネットワークを構築し, グローバルコネクティビティを持つ 2 人がゲートウェイとなる. この 2 つのゲートウェイを利用することより, 3 人の持つ移動計算機は, それぞれ, 2 つのコネクティビティを持っているように, 通信を行なうことが可能である.

図 2.1 は本研究が目指す移動計算機環境を示している. 図 2.1 では, PDA が 802.11b を利用し, Laptop PC は携帯電話で, インターネットへの通信を行なっている. そして, インターネットへの無線通信インターフェイスを持たない, 携帯型 MP3 プレイヤ (MP3Player) は, PDA および携帯電話と通信を行ない, 双方のインターネットへの通信インターフェイスを利用して, インターネットと通信を行なっている. また, PDA, Laptop PC も互いの通信インターフェイスを利用して通信を行なうことが可能である.

2.2　協調通信機構への要件

本研究で実現する協調通信機構に対する機能要件を以下に示す.

- 移動透過性・着信可能性
  計算機の移動にともなう, IP アドレスの変化を隠蔽する機能.

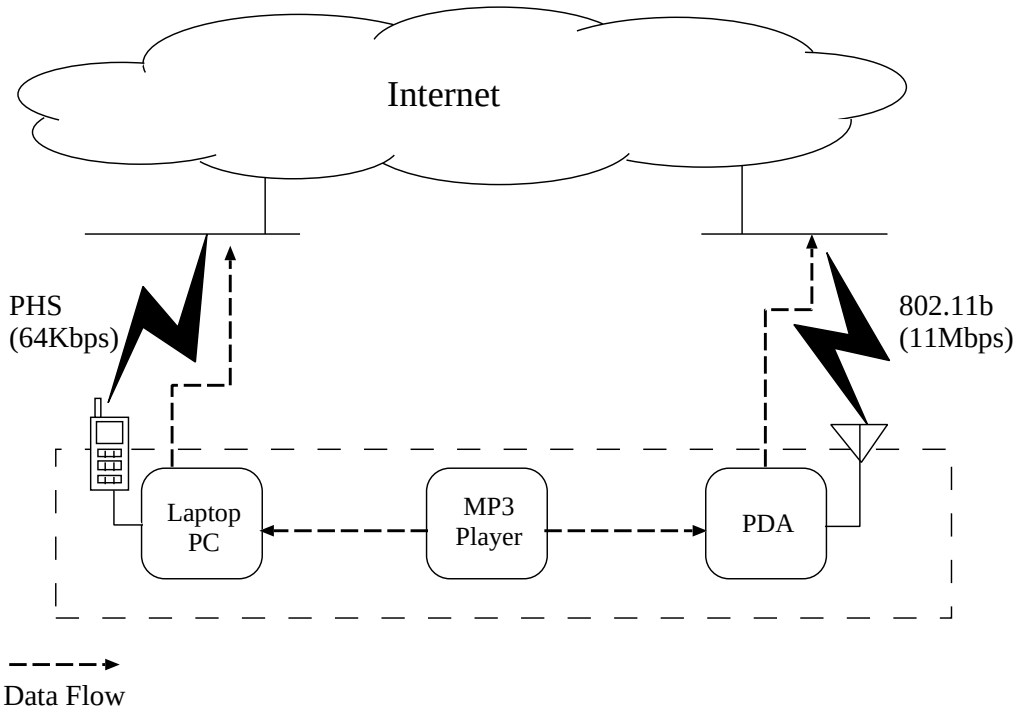

図 2.1: 本研究により実現される移動計算機通信環境

ストリーミングでのアプリケーションや, TCP [8] を利用したセッションなどでは, 移動中でも通信を継続して行なうことが求められる.

- 複数の外部接続性の利用
  集合内に複数のゲートウェイが存在する状況がある. 集合内部の移動計算機に対して, それらの複数のゲートウェイを利用する機構を提供する必要がある.

- 動的な接続性への対応
  インターネット接続性を提供するゲートウェイが動的に変化する. 集合内の移動計算機は, ゲートウェイの状態変化を前提として, 通信を行なう必要がある.

- 動的な集合の形成
  移動計算機により形成される集合は, 動的に形成される必要がある. その集合は, 前もって決定された管理機構を持たない.

- 集合内通信の汎用性
  集合内に存在する複数の移動計算機間での通信方法に汎用性がある必要がある. 集合内が, マルチホップなネットワークであっても, Mobile Ad Hoc Network [9] であっても, 協調通信が行なえる必要がある.

2.3 現在行なわれている研究

ここでは, 2.2 節で挙げた機能要件に関して, 現在行なわれている研究について述べる.

2.3.1 移動透過性・着信可能性に関する研究

移動透過性に関する研究は, 移動計算機支援プロトコルとして研究されている. IP アドレスは, 計算機の移動にともなう接続先ネットワークの変化に応じて変動する. これにより, 計算機が移動すると, IP アドレスによる計算機の識別ができず, 移動前に行なっていた通信が遮断されてしまう. また, インターネット上から移動計算機に対して通信を開始することができなくなる.

移動計算機支援プロトコルでは, このような通信の遮断および特定の不可能を解決している. ここでは, 移動支援プロトコルとして, MobileIPv6 [10] と Location Independent Networking for IPv6(LIN6) [11] について述べる.

Mobile IPv6

概要 Mobile IPv6 は現在, Internet Engeniering TaskForce(IETF) [12] において標準化の議論中である. Mobile IPv6 は常に一意なアドレスと, 現在計算機が持つアドレスの対応付けを管理することにより, 移動透過性および着信可能性を提供する機構である.

機構 図 2.2 に Mobile IPv6 の動作概要を示す. Mobile IPv6 では, Mobile Node(MN) の移動前後のアドレスを Home Agent(HA) が管理している. HA は, MN がもともと所属する Home Link の Router であり, MN は常に HA から取得した Home Address により一意に識別することが可能である. MN は Home Link から移動し, Foreign Link に接続すると, Foregin Link から Care of Address(CoA) と言うアドレスを取得する. MN は CoA を取得すると, Home Address と CoA の対応付けである Binding Update を, HA に対して送信する. HA が Binding Update を受信することにより, HA は Binding Cache として, MN の現在のアドレスと Home Address の Binding を保持する.

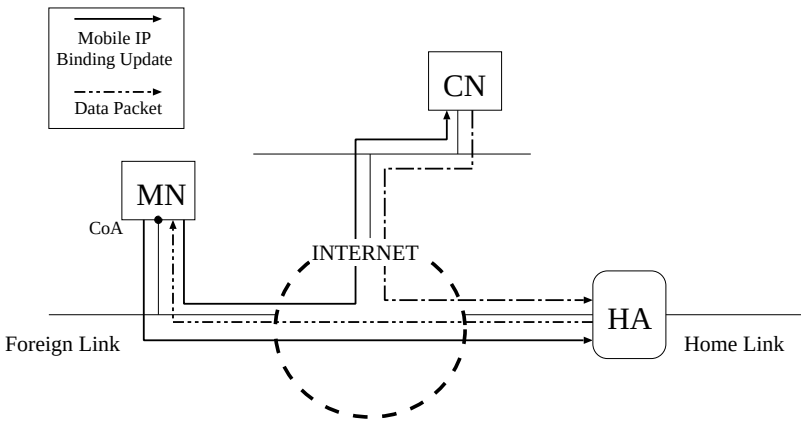

図 2.2: Mobile IPv6 の仕組み

MN と通信を行なう計算機, Correspondant Node(CN) が MN に向けてパケットを送信する際には, MN の Home Address を送信先アドレスとして送信する. CN からのパケットはインターネットの通常のルーティングにより, Home Link に到着する. HA は, Foregin Link にいる MN 宛のパケットを受け取ると, これを MN の CoA に向け転送する. MN は, HA により転送された CN からのパケットを受信すると, CN に対して, Binding Update を送信する. CN が Binding Update を受信し, Binding Cache として保持する. これにより, CN と

MN は HA を介さず, 直接通信を行なうことができる. CN はパケットを送信する前に自分の持つ Binding Cache を検索し, 合致する CoA があれば, 直接 CoA に向け送信する.

特徴 Mobile IPv6 の特徴として, 移動支援機構は全て, ユーザアプリケーションから隠蔽されている点が挙げられる. この特徴により, ユーザアプリケーションは, 移動によるアドレスの変化を意識せずに, 常に Home Address を利用して, 通信を継続させることが可能である.

LIN6

概要 LIN6 では, ノードの識別子と位置関係を縮退させた縮退アドレスを利用する. アプリケーションは, この縮退アドレスを利用して通信することにより, 位置に依存しない移動透過性を実現している.

機構 LIN6 では, IPv6 アドレスの下位 64 ビットをノード識別子, 128 ビット全体を位置指示子とする. このようにノード識別子が縮退されたアドレスを LIN6 アドレスとよび, ネットワーク層以下では, LIN6 アドレスを利用して通信を行なう. LIN6 ではノード識別子と位置指示子の対応をマッピングとして, Mapping Agent(MA) が管理する. MA はこのマッピングを保持し, CN からの要求に応じて, 指定されたノードに対する位置指示子を通知する.

特徴 現在の実装では, インターフェース識別子の上位 24 ビットを判別し, LIN6 特定の Organizationally Unique Idetifier(OUI) であれば, LIN6 アドレスであると判断する. そのため, OUI を LIN6 の処理に利用するので, 実質なアドレス空間は 40 ビットとなる. また, 複数の MA を設置することにより, 対応付けによるオーバヘッドを分散することが可能である.

2.3.2 複数の外部接続性の利用に関する研究

計算機において, 複数の外部接続性を利用する研究に関しては, まず複数インターフェイス通信機構 [13] が挙げられる. 複数インターフェイス通信機構では, 複数のインターフェイスを選択して通信する機能, および同時利用を実現している. また, Default Router Selection [14] では, 複数のゲートウェイを利用するための手法について提案を行なっている.

複数インターフェイス通信機構

概要 複数インターフェイス通信機構では, 計算機に複数のインターフェイスを搭載し, これらを利用する. 複数インターフェイスの同時利用, およびインターフェイスの状況に応じたインターフェイスの切り替えを実現することにより, 通信可能範囲の拡大と, 通信帯域の拡大が可能である. 複数のゲートウェイの利用方法に関しては, ユーザ設定したポリシにより決定される. このシステムは Mobile IPv6 の拡張として実現されている.

機構 図 2.3 が複数インターフェイス通信機構の概要図である. MN において, 複数のインターフェイスを扱うためには, それぞれのインターフェイスが持つ CoA を全て扱う必要がある. HA には, どれか 1 つの CoA を primary CoA として登録する. CN に対しては, それぞれ Binding として送信する CoA を CoA Selection により選択し, Binding Update を送信する.

また, 複数インターフェイス通信機構はユーザのポリシを反映する機構を備える. ユーザは行なう通信の種類ごとに, 送信する CoA を選択する. ポリシとして設定する情報としては,

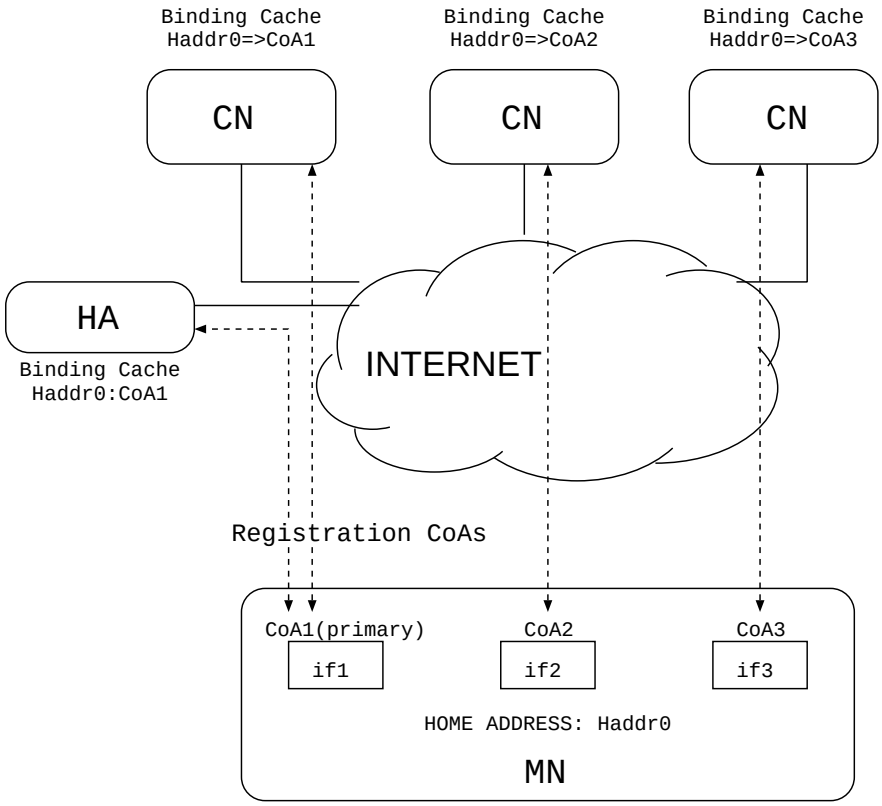

図 2.3: 複数インターフェース通信機構

通信相手の IP アドレスごと, ポート番号ごと, フロー ID ごとがある. それぞれの通信ごとに, どの通信インターフェースを利用するかをポリシとして設定する. MN は自分のローカルポリシを Binding Update と同時に CN に対して告知する. CN がポリシ情報が格納された Binding Cache を持つことにより, MN のポリシに合致したインターフェイスに向けてパケットを送信することができる.

特徴 複数インターフェイス通信機構の特徴は, 1 つの移動計算機に複数のインターフェイスを搭載することにより, 常時接続性および通信帯域の向上を実現している点にある. 常時接続性および通信帯域の問題は, 無線通信インターフェイスの特性に起因する. つまり, 位置に依存した電波状況により, 通信に利用できる帯域および通信可能範囲が変化する. このため, 無線通信インターフェイスを利用する限り, 常にこれらの問題が生じる. このような, インターフェイスの特性による問題を解決するためには, 異なる特性を持つインターフェイスを複数搭載し, 補完しあうことが有効である.

Default Router Preference and More-specific Routes(Default Router Selection)

概要 計算機が, マルチホームであり, ルータが複数のネットワークに接続している状況において, 適切なルータを選択する機構を提供する. この機構は, IPv6 の仕様に拡張を行ない実現している.

機構 この機構は, IPv6 における近隣探索プロトコル (Neighbor Discovery Protocol, NDP) [15] を拡張することにより, 実現している. NDP におけるルータ通知メッセージに, Default Router Preference フィールドを設け, ルータの優先度を通知している. また, オプションとして Router Information Option を拡張し, そのルータの経路情報を広告する. 計算機は, 複数のルータ通知メッセージを受信し, それらのルータ通知メッセージの Default Router Preference を比較し, 実際に利用するゲートウェイを決定する.

特徴 この機構では, ゲートウェイの情報は NDP におけるルータ通知メッセージとして, 通知される. ルータ通知メッセージはホップリミットが 1 に設定されて送信されるため, 同一セグメントに存在するゲートウェイの情報しか, 取得することができない.

2.3.3 集合内通信に関する研究

移動計算機の集合から通信を行なう技術に関する研究としては, MANET 技術と, 移動ネットワーク技術に大別できる. これらの, 技術を用いて集合内からの通信を行なうことが必要である.

移動ネットワーク技術には Mobile Network Support in Mobile IPv6 [16] と Mobile Router Support with Mobile IPv6 [17] がある. 両者ともに Mobile IPv6 をもとに, 移動ネットワークにおいて, 移動の隠蔽を実現している.

Mobile Ad Hoc Network(MANET)

概要 Mobile Ad Hoc Network(MANET) は IETF のワーキンググループとして, 標準化が行なわれている.

MANET とは, 無線通信インターフェイスで接続された移動計算機同士が, 動的なネットワークを形成し, 相互通信を行なう自律システムである. 全ての移動計算機はルータとして, 他の計算機のパケットを転送する. ルータが動的に移動するため, MANET 内のトポロジーは頻繁に変更される. このため, MANET 内部での独自ルーティングプロトコルの開発が行なわれている.

機構 MANET では, Dynamic Source Routing(DSR) [18] や Ad Hoc On Demand Distance Vector(AODV) [19] といったルーティングプロトコルが提唱されている. これらのルーティングプロトコルにより, MANET 内での相互通信が可能になる. また, MANET 内に対して, インターネットへの接続性を提供するための研究も行なわれている. Mobile IP for Mobile Ad Hoc Network(MIPMANET) [20] および, Internet Connectivity for Mobile Ad Hoc Network [21] では, 外部接続性を持った Mobile IP 計算機が MANET からのゲートウェイとして機能する. この機構では, Mobile IP の利用により, MANET 内の移動透過性・着信可能性を提供している.

特徴 MANET では, 設定された管理機構を持つことなく, 一時的な移動計算機の集合を構築し, 通信を行なうことが可能である. 本研究で想定する環境では, このようなアドホックな環境が想定される.

Mobile Network Support in Mobile IPv6(Mobile Network)

概要 この研究では, Mobile IP の移動ネットワークへの適応を行なっている. この研究では, 移動ネットワーク内ノードの移動支援は, Mobile Router と呼ばれるゲートウェイが行なう. このため, 移動ネットワーク内のノードは移動体通信プロトコルに対応している必要が無いという利点がある.

機構 2.4 に Mobile Network の仕組みを示す. Mobile Network では, Mobile IPv6 の Binding Update の拡張オプションとして, Prefix Scope Binding Update Option を定義している. Mobile Router が, ネットワーク内のプレフィクスと Mobile Router の CoA の Binding を送信する. HA は, その prefix を持つノードへのパケットを全て Mobile Router に向けて送信する. HA からのパケットは Routing Header を利用して, Mobile Router を経由して各 node に届けられる. 図で, HA から送信されるパケットの Routing Header には, 通信相手である Node2 のアドレスが格納されており, Destination Address には, Mobile Router の CoA が格納されている. このパケットは, まず, Mobile Router に届けられた後, Routing Header の処理により, Node2 に転送される.

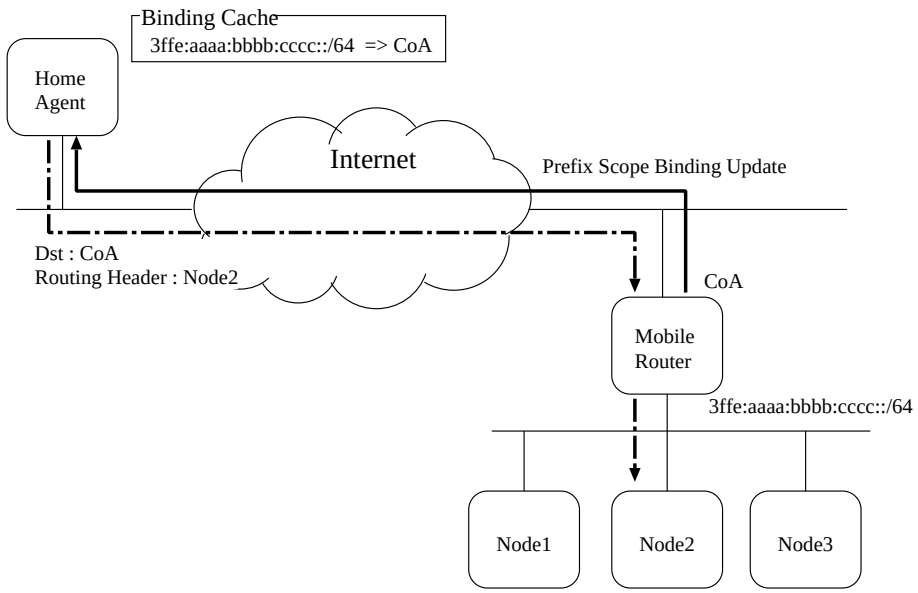

図 2.4: Mobile Network 概要

特徴 ネットワーク内の各ノードは移動から隠蔽されているため, 各ノードが移動ネットワーク内から, 移動透過性を保ったまま, 移動ネットワーク外に移動することが困難である. また, ゲートウェイがあらかじめ静的に設置されている必要がある. 本研究では, 集合内に設定された管理機構を想定しない.

Mobile Router Support with Mobile IPv6(Mobile Router)

概要 Mobile Network とは異なり, 既存の Mobile IPv6 に一切変更を加えずに Subnet の移動透過性を保証する機構を提案しているのが Mobile Router である. Mobile Router の利用によ

り, Mobile Network が提供している機能と全く同じ機構を提供することができる.

機構 さらに, Mobile Network のように Binding を利用して Subnet の移動透過性を保証する機構とは異なりトンネルを利用するため, Subnet のネスティングも簡単に実現することができる. 具体的には, それぞれの Mobile Router は移動を行う度に自分の HA のみに対してトンネルを張る. よって通信相手と Mobile Router 間での経路の最適化等は一切行われないがネスティングに対応した Subnet の移動透過性を保証する.

特徴 移動ネットワーク技術では, インターネットに接続しているゲートウェイは 1 つであると想定されている.Mobile Subnet と同様, ゲートウェイがあらかじめ静的に設置されている必要がある. 本研究では, 集合内に設定された管理機構を想定しない.

2.4 考察

これまで述べた既存の研究について, 機能要件ごとにまとめる. また, それぞれの研究が, 各要件を実現できているか検証する. 表 2.1 に各技術と, その技術が満している機能要件の関係を示す.

それぞれの記号は, 以下の意味を示す. ○ は, その研究を利用することにより, 実現することが可能である機能. △ はその研究においては想定されていないが, 拡張することにより実現可能である機能. × は実現することができない機能である.

表 2.1: 既存研究の比較

	1	2	3	4	5
Mobile IPv6	○	×	×	×	×
LIN6	○	×	×	×	×
複数インターフェイス通信機構	△	○	○	×	×
Default Router Selection	×	○	×	×	×
MANET	×	×	×	○	○
Mobile Network	○	×	○	×	×
Mobile Router	○	×	○	×	×

1. 移動透過性・着信可能性
2. 複数の外部接続性の利用
3. 動的な接続性への対応
4. 動的な集合の形成
5. 集合内通信の汎用性

表 2.1 から分かるように, 本研究で目指している移動計算機環境を実現できるシステムは, 現在存在していない. 5 つの機能要件のどれかを実現するシステムは存在しているため, 既存技術の組

合せにより解決する可能もある. しかし, MANET と移動ネットワーク技術などは, 互いに反する技術のため, 単純に既存技術を組合せただけでは, 実現することは不可能である.

そこで, 本研究では, 上記の機能要件を全て満すシステムを構築する. このシステムを, 複数の計算機による協調通信機構として提案する. 協調通信機構に関しては, 次章以降で詳しく説明する.

第3章　計算機協調モデルによる解決

本章では, 本研究で目指す移動計算機環境を実現するためのモデルについて述べる. はじめに考えられる 2 つのモデルであるゲートウェイ管理モデルと, 計算機協調モデルについて述べ, 本研究における実現へのアプローチを述べる.

3.1　ゲートウェイ管理モデル

ゲートウェイ管理モデルでは, あるゲートウェイがネットワークを持ち, ネットワーク内の各計算機に対して, インターネットへの接続性や, 移動透過性・着信可能性などを提供する. また, 複数の外部接続性を利用する場合には, ゲートウェイがそれら全ての接続インターフェイスを保持する必要がある. ゲートウェイ管理モデルを実現する研究としては, 既述の移動ネットワーク関連研究があげられる.

図 3.1 に, ゲートウェイ管理モデルでの移動計算機環境の概要を示す. このモデルでは, ゲートウェイ (Gateway) が, 複数の通信インターフェイスを持ち, 内部のノード (Internal Node) に対して, 接続性の提供を行なっている. また, ネットワークの移動に従う, ゲートウェイのネットワーク的な移動は, ゲートウェイで処理され, 内部のノードからは隠蔽されている.

自動車や電車など, 交通システム内の計算機に対して, インターネットへの接続性を提供する技術も研究されている. これらの研究においては, 通信範囲および通信帯域の拡大は, ゲートウェイ管理モデルをもとに, 行われている. ゲートウェイ管理モデルにもとづいて, 複数計算機の移動支援を行なっている実例としては, インターネット ITS(IITS) プロジェクトにおける車内ネットワークがある. IITS プロジェクトでは, 802.11b, 複数の PHS, Dedicated Short Range Communication(DSRC) など, 7 つのインターフェイスを自動車に搭載し, 通信を行なうシステムを構築している.

3.2　計算機協調モデル

計算機協調モデルでは, 複数の計算機が持つそれぞれのグローバルコネクティビティを共有することにより, 集合内からインターネットへ接続する.

3.2.1　仮想的なインターフェイスによる協調通信

本研究では, 主に自動車内の環境を想定する. 自動車内には, マイクロノードを含め, 多くの移動計算機が集合している. その中には, 広帯域な通信が可能な無線通信インターフェイスを持った計算機や, 非常に広範囲で利用可能な無線通信インターフェイスを持った計算機などがある. また, 自動車外への通信を行う無線通信インターフェイスを持たない計算機なども存在する. インターフェイスの協調とは, これら複数の移動計算機が持つインターフェイスを, 自動車内の全ての計算機で共有して利用することを指す.

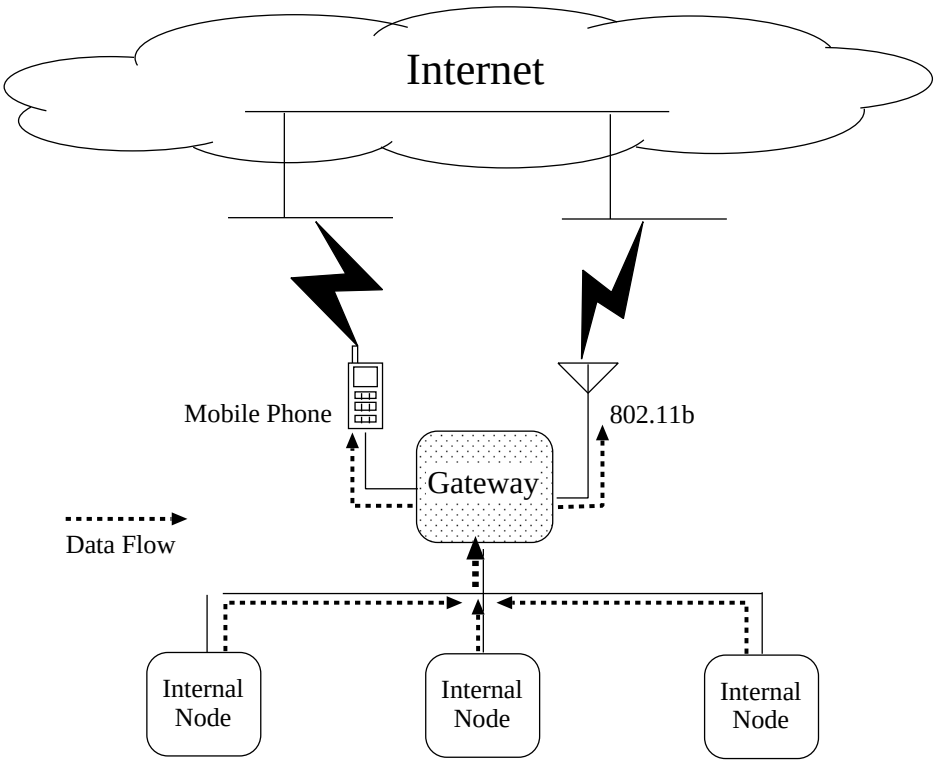

図 3.1: ゲートウェイ管理モデル

計算機協調モデルでは, 1 つの通信インターフェイスしか持たない計算機でも, 他の計算機の通信インターフェイスと協調を行うことにより, 複数のインターフェイスを持っているかのように, 通信を行うことが可能である. これにより, 通信環境の安定性や広帯域な通信帯域を獲得することができる.

計算機協調モデルでは, 複数移動計算機間で協調を行なうことにより, 集合内でのインターネット接続性を提供する. それぞれの計算機が持つインターフェイスを集合内で共有することにより, 仮想的なインターフェイスを利用することを可能とする. このように, 計算機同士が互いの通信環境を補完しあう通信モデルを協調モデルとよぶ.

図 3.2 に仮想的なインターフェイスによる協調通信モデルを示す. 移動計算機 (Mobile Node)A および C はそれぞれ, 携帯電話と無線 LAN の通信インターフェイスを持ちインターネットに接続している. しかし, この計算機 A ~ C 間では, 協調通信モデルによる通信が可能なため, 全ての計算機が, 他の計算機の持つインターフェイスを仮想的に搭載している. 図 3.2 では, 斜線の入ったインターフェイスが仮想的に搭載されたインターフェイスである. 移動計算機 A は, インターネットへの接続インターフェイスは 1 つも搭載していないが, 仮想的なインターフェイスによりインターネットへの通信が可能である.

3.3 本研究におけるアプローチ

本研究においては, 計算機協調モデルを採用する. ゲートウェイ管理モデルでは, 1 つの静的なゲートウェイが集合内の各計算機に対して, 接続性の提供を行なう. このようなモデルは集合自体

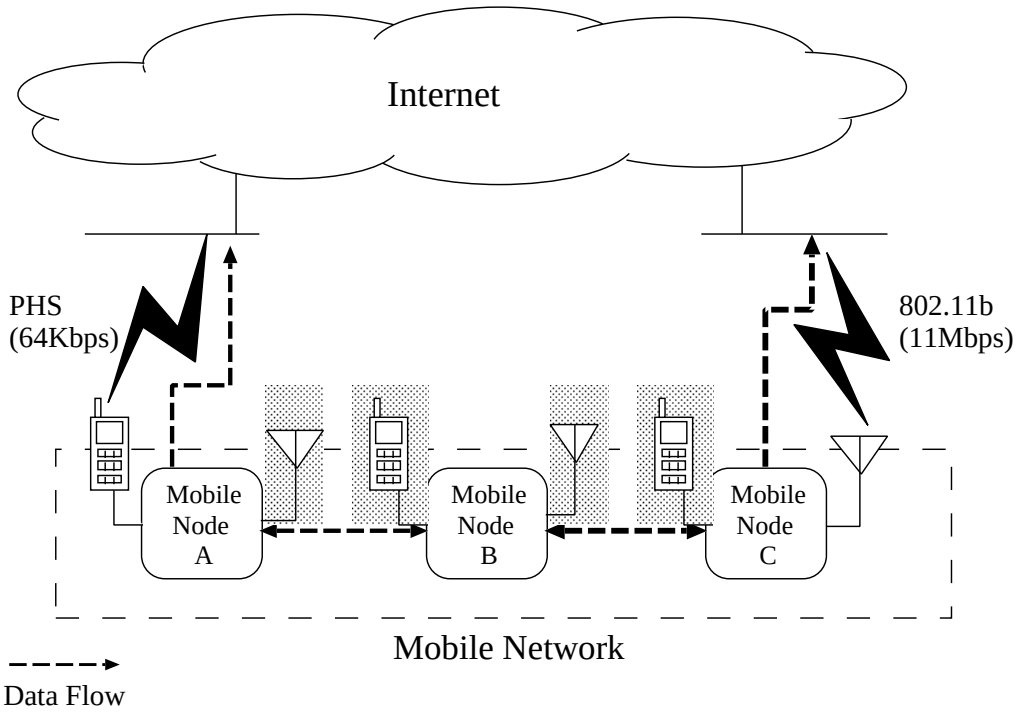

図 3.2: 内部ネットワークによる仮想インターフェイス

が静的に設定されている場合には, 安定した接続性を提供することが可能である. しかし, 本研究で想定する自動車内など, 各計算機が集合への入出を頻繁に行なう環境においては, あらかじめ設定されたゲートウェイを前提としていない. 内部ネットワークの動的なトポロジーの変化に対応することが困難である.

また, 複数の外部接続性の利用に関しても問題がある. 複数の外部接続性の利用を実現するためには, ゲートウェイに対して大量のインターフェイスを搭載する必要がある. これらのインターフェイスの設置, 利用および管理には, それぞれ金銭的, 作業的にコストが必要となる. 内部に存在する計算機が多くなれば, それに比例して, ゲートウェイが持つインターフェイスも増加させる必要がある.

しかし, 計算機協調モデルにも問題点がある. 全ての計算機はそれぞれ全く独立して移動するため, インターネットへの接続性を持つ計算機が近隣にいない場合には, インターネットに接続することができなくなる. つまり, ユーザの意思とは関係なく, 通信が断絶する恐れがある. しかし, 無線通信インターフェイスの普及や, 街頭などでの無線 LAN サービス, 電車・飛行機内でのネットワーク接続サービスの提供など, 様々な接続形態の普及により, 無線通信環境は広範囲において提供されている. このため, 計算機協調モデルでの問題点は, 解決されると考えられる.

以上の理由から, 本研究では, 計算機協調モデルを利用して, 集合内へのインターネット接続性の提供機構を実現する.

3.4 本研究における用語

本研究において用いられる用語の定義を行う. 図 3.3 に全ての要素を示す.

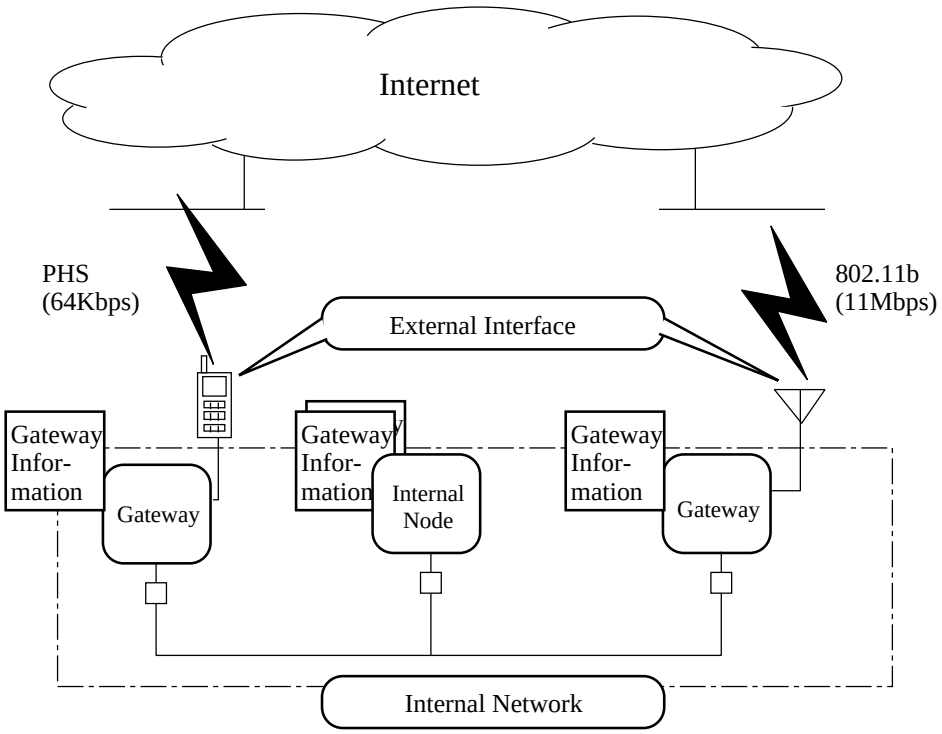

図 3.3: 本研究における用語

- 内部ネットワーク (Internal Network)
  複数の移動計算機による集合自体を示す. 内部ネットワーク内では, 計算機間の通信が可能である.

- インターナルノード (Internal Node)
  内部ネットワーク内の全てのノードを示す.

- ゲートウェイ (Gateway)
  インターナルノードが, 他のインターナルノードに対して, インターネットへの接続性を提供している状態を示す. ゲートウェイは, 移動ネットワーク内部と, インターネットの両方に接続している. インターナルノードは, インターネットへの接続性を獲得すると, ゲートウェイとしての機能を持つことが可能である.

- 外部インターフェース (External Interface)
  ゲートウェイが持つインターフェースのうち, インターネットへ接続しているインターフェースを示す.

- ゲートウェイ情報 (Gateway Infomation)
  ゲートウェイが持つ, 各外部インターフェースに関する情報, およびゲートウェイとして機能するための情報. 外部インターフェイスに関する情報とは主に, インターフェイスの特性に関わる情報を指す. ゲートウェイとして機能するためには, プレフィクスなどの経路に関する情報が必要となる. インターナルノードはこの情報をもとに利用するゲートウェイを選択する.

第4章　Multiple Gateway in Mobile Network の設計

本章では, Multiple Gateway in Mobile Network(MGMN) のシステム設計を行う.

4.1　移動ネットワークを利用した協調通信

移動計算機間の協調を行うためには, 計算機間でインターネット接続性に関する情報の交換を行なう必要がある. 本研究においては, 移動計算機間で一時的にネットワークを構築し, 計算機間の通信を行なう. 移動計算機同士で, 個別に 1 対 1 の通信を行なう方法も考えられる. しかし, 近隣に存在する移動計算機はそれぞれ独立して移動するため, 必要に応じて移動計算機を発見することが不可能である.

本研究では, 内部ネットワークを一時的に構築し, 協調通信のための基盤とする. しかし, その内部ネットワークの構成によっても実現手法が異なる. インターナルノードがインターネットと通信を行なうためには, まずゲートウェイから, グローバル IPv6 アドレスを取得し, そのゲートウェイを利用して, インターネットとの通信を行なう. 内部ネットワークが, 複数のセグメントから構成されるマルチホップなネットワークの場合, 外部への接続性に変化が生じる度に, ゲートウェイから新しい IPv6 アドレスを取得し, かつゲートウェイまでのルーティングを行なう必要がある. また, 内部ネットワークが MANET により構築されている場合もある. MANET であっても, 内部なマルチホップであり, アドレスの再取得およびルーティングの変更を行なう必要がある.

本研究においては, 内部ネットワークは 1 つのセグメントから構成される 1 ホップネットワークであると仮定する. 本研究では, 自動車や電車内など, 内部ネットワークを 1 セグメントで構築することが可能である環境を想定している. 1 ホップな内部ネットワーク内に複数のゲートウェイが存在する場合, インターナルノードは, 複数のゲートウェイから取得した複数のアドレスを持つ. このような状態は, マルチホーム状態と呼ばれる.

図 4.1 に仮定するネットワークを示す. 図 4.1 では, 各インターナルノード (Internal Node) は, それぞれ 2 つのゲートウェイ (Gateway A, Gateway B) からそれぞれ, `3ffe:aaa:bbb:ccc::/64` と`3ffe:111:222:333::/64` というネットワークアドレスを取得し, 2 つの IPv6 アドレスを保持している.

4.2　現状の問題点

MGMN システムを実現するにあたり, 現状では以下のような問題がある.

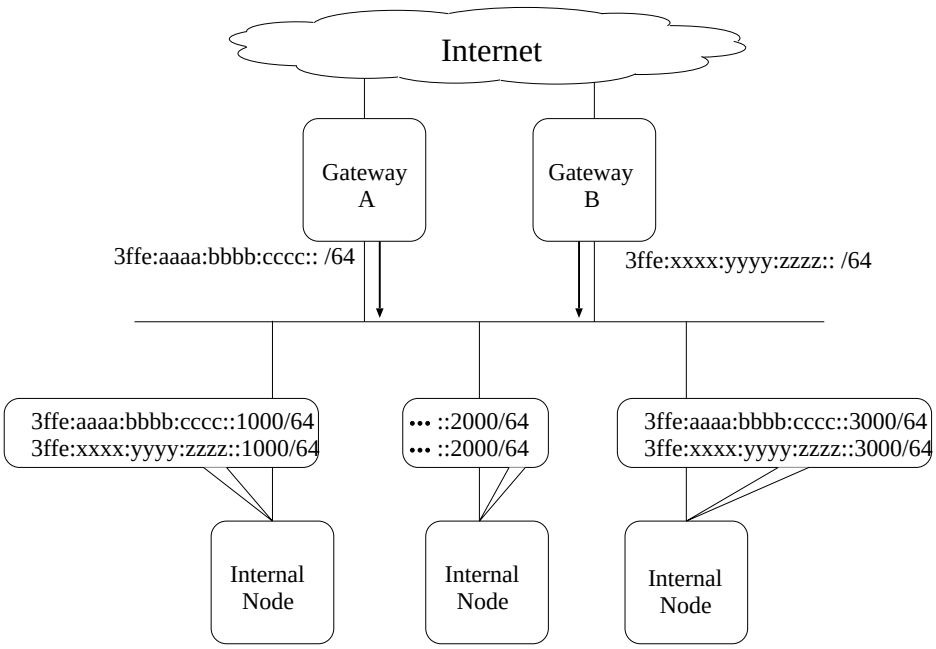

図 4.1: 1 セグメントネットワークでの複数ゲートウェイ

4.2.1 取得可能なゲートウェイ情報

インターナルノードが, 複数のゲートウェイから, 利用するゲートウェイを選択するためには, 全てのゲートウェイの情報を取得する必要がある. 現在の IPv6 インターネットにおいて, ゲートウェイに関する情報は, 近隣探索プロトコル (Neighbor Discovery Protocol, NDP) [15] を利用して取得できる. NDP では, ルータ要請メッセージ (Router Solicitation) と, ルータ通知メッセージ (Router Advertisement) を利用して, 計算機はゲートウェイに関する情報を取得する.

しかし, NDP で広告される情報は限定されている. ゲートウェイの移動ネットワークに対するインターフェイスの情報は取得できるが, ゲートウェイが外部ネットワークにどのように接続しているかについての情報は取得できない. また, NDP の各メッセージは, 全てリンクローカルスコープで用いられるので, ネットワークをまたいだ中継が行えない. 内部ネットワーク内に複数のサブネットが存在している場合, ゲートウェイの情報を共有できない.

4.2.2 ゲートウェイの選択利用

現在のインターネットでは, エンドノードが利用するゲートウェイは, 基本的に単一であると仮定されている. このため, 複数のゲートウェイ情報を取得しても, それらを有効利用するための機構が存在していない. 移動ネットワーク環境において, 複数のゲートウェイを利用することの利点としては, 主に常時接続性の向上や, 利用通信帯域の拡大がある. これらを実現するためには, 複数のゲートウェイを, 通信ごとに選択して利用する機構が必要である.

現在の IPv6 の仕様では, 複数のゲートウェイが存在する際には, 経路表および通信相手の IP アドレスをもとに利用するゲートウェイを決定する [22]. この機構は, 送信元アドレス選択 (Source Addrsss Selection) とよばれる. しかし, 効率的にゲートウェイを利用するためには, 経路情報の

みでは不十分である. しかし, インターフェースの種類などをもとにゲートウェイを選択する機構が存在していない.

4.2.3 ネットワークアドレス自動設定機構

IPv6 では, IP アドレスの自動設定機構が組み込まれている. このため, 通常のネットワークでは, 計算機がネットワークに接続すると, 自動的に一意なアドレスが取得できる. これは Stateless Address Autoconfiguration [23] と呼ばれ, NDP を利用して以下のように実現されている. IPv6 アドレス 128 ビットの内, 最初の 64 ビットはネットワーク識別子として, ネットワーク内のルータにより各ノードに配布される. プレフィクスを受信した各ノードは, 受信したインターフェイスが持つ 48 ビットの MAC アドレスから 64 ビットのノード識別子を作成 [24] し, ネットワーク識別子とノード識別子を合わせ, 128 ビットの IPv6 アドレスを取得する.

ゲートウェイがインターナルノードに対して配布するアドレスは, インターネットにから一意に識別可能である必要がある. このため, ゲートウェイは現在接続しているネットワークから, インターナルノードに配布するプレフィクスを取得する必要がある. しかし, 現在の Address Autoconifguration では, ゲートウェイがプレフィクスを取得する機構は定義されていない. 文献 [25] では, ICMP の機能を拡張し, この機構を実現しようとしているが, 実現にあたっては, まだ議論の段階である.

4.3 MGMN

本研究において, 実現される MGMN システムの概要について解説する.

4.3.1 移動計算機通信支援プロトコルの利用

全のてインターナルノードは, 複数のゲートウェイからアドレスを取得する. それらのアドレスはゲートウェイの移動に従い, 動的に変化する. アドレスの切り替えが生じると, それまで行なっていた通信を継続させることが不可能になる. また, インターナルノードをインターネットから特定することも不可能となる. この問題は, 通常の移動計算機通信で生じる, 移動透過性および着信可能性の問題と同様である. アドレスの変化が, 移動計算機自身の移動により生じたか, ゲートウェイの移動により生じたかの差である. このため, 通常の移動計算機支援プロトコルを利用することにより, 解決可能である.

本研究においては, 移動計算機通信支援プロトコルとして Mobile IPv6 を利用する. Mobile IPv6 では, CoA の数が限定されていないため, 本研究で想定されるマルチホーム状態でも動作させることが容易であるからである. このように, インターナルノードは, 1 つのインターフェイスに複数の CoA を持つ Mobile IPv6 ノードである.

4.3.2 ゲートウェイに関する情報

本研究で想定する移動ネットワークでは, ゲートウェイの移動にともない, インターネットに接続する方法が変化する. ゲートウェイの変化に応じて, ゲートウェイの利用方法を変化させるためには, より多くの情報をゲートウェイから取得することが有効である.

たとえば, あるゲートウェイの無線 LAN の電波状況が悪化し, 利用可能帯域が 11Mbps から 2Mbps に変化した場合, エンドユーザは他の 11Mbps の帯域が利用できる, より良い電波状況のゲートウェイに切り換えることにより, それまでより広帯域な通信が可能である. この例では, インターナルノードは, 現在の利用可能帯域をもとにゲートウェイを選択している. しかし, ゲートウェイに関する情報を多く取得することにより, ゲートウェイの様々な状況変化に対応して, 利用するゲートウェイを変化させることが可能である.

このため, ゲートウェイは, エンドノードがより最適な選択を行えるような情報を告知するべきである. その情報とは, 主にゲートウェイでのパケット転送能力に影響を及ぼす要素である. 情報の一般化により, 以下の 4 つの情報にまとめる.

- インターフェイス特性
  インターフェイスが持つ特性. 最大転送帯域や Max Transfer Unit (MTU), 接続形態など.
- インターフェイス状況
  移動に伴って変化するインターフェイスの現在の状況. アドレスや Round Trip Time (RTT), 現在のスループット. また, 無線通信インターフェイスの場合, 電波強度などがある.
- 処理能力
  ゲートウェイの処理能力. 元々の CPU 能力だけではなく, 現在実行されている他のプロセスの影響によっても, パケット転送能力に影響する.
- 利用コスト
  ゲートウェイを利用するために必要なコスト. 携帯電話などでのダイアルアップ接続の場合, 課金情報などがある.

4.3.3 システム概要

MGMN では, 内部ネットワーク内の全ての計算機が同じ機能を保持している. その機能とは, 以下の 3 つである.

- インターフェイス情報取得機構
- ゲートウェイ情報共有機構
- ゲートウェイ選択機構

図 4.2 は各モジュールと, それらが扱うデータベースの関連を示している. インターフェイス情報取得機構 (Interface Information Check) は, 常に計算機が持つインターネットへの接続インターフェイスの情報を取得している. そして, その情報をゲートウェイ情報共有機構 (Gateway Information Sharing System) により, 内部ネットワークの計算機で共有する. 他のゲートウェイの情報も, ゲートウェイ情報共有機構から取得し, ゲートウェイ情報データベース (Gateway Information Database) で保持する. ゲートウェイ選択機構 (Gateway Selection) は, 内部ネットワークに存在する全てのゲートウェイから, 実際に通信に利用するゲートウェイを選択する.

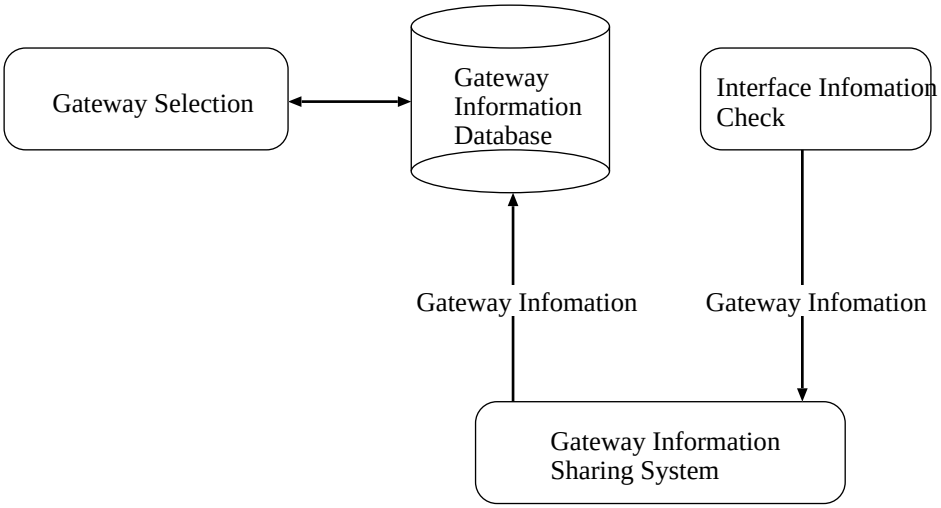

図 4.2: モジュール関連図

4.3.4 インターフェイス情報取得機構の設計

全ての計算機は, 定期的にインターフェースの状態を取得する. その情報をインターフェイス情報キャッシュとして保持する. 移動などの状況の変化に応じて, インターネットへ接続可能なインターフェイスが有効になると, ゲートウェイ状態に遷移する. ゲートウェイ状態では, ゲートウェイ情報共有機構にインターフェイスの情報を送信し, ゲートウェイとして他の計算機に対して, インターネットへの接続性を提供する.

4.3.5 ゲートウェイ情報共有機構の設計

MGMN では, ゲートウェイの情報は, 内部ネットワーク内の全てのインターナルノードで共有される必要がある. MGMN においては, ゲートウェイがネットワーク内に, 自分の情報をフラッディングすることにより, 内部ネットワーク内でゲートウェイ情報の共有を実現する. フラッディング以外の共有手段としては, ゲートウェイ情報の集中管理するためのゲートウェイ情報管理サーバを設置する方式も考えられる. インターナルノードは, ゲートウェイ情報管理サーバと通信を行ない, ゲートウェイの情報を取得する. しかし, 移動計算機環境においては, ネットワークの環境は非常に不安定である. このため, ゲートウェイ情報管理サーバとの通信が行なえず, ゲートウェイ情報を取得できない状況がある. また, ノードが自律的に各ゲートウェイに情報の問い合わせを行う手段が考えられる. しかし, 本研究で想定する移動ネットワークにおいては, 移動に従い, 動的にゲートウェイが出現する. このため, インターナルノードが, ある時間におけるゲートウェイの位置を把握することができない.

このため, 本研究では, ゲートウェイが全てのノードに対して, 情報をフラッディングする方式を採用する. しかし, 情報のフラッディングは, ネットワークに負荷をかけ, 他の通信を阻害する恐れがある. このため, フラッディングにより共有される情報は, 最低限にする必要がある. フラッディングと, 個別問い合わせを組合せることにより, 効率化が可能である. ゲートウェイの IP アドレスなどの最低限の情報のみをフラッディングにより共有し, その他の詳細なゲートウェイ情報は個別にゲートウェイに問い合わせることが考えられる. しかし, この方法では, 逆にインターナ

ルノードでの処理が増加する. フラッディングにより共有する情報と, 個別問い合せにより取得する情報との切り分けに関しては検討する必要がある.

また, 内部ネットワーク内の各ノードは, ゲートウェイ情報共有機構により共有されたゲートウェイ情報を, ゲートウェイ情報テーブルに保持する.

ゲートウェイ情報

ゲートウェイ情報共有機構により共有される情報について述べる. ゲートウェイは自分に関する情報を取得する. これらの情報には, 動的に変化する情報と静的な情報がある. 表 4.1 に計算機から取得可能な情報をまとめる. これらの情報は主にパケット転送能力に影響する情報である. インターナルノードはゲートウェイのパケット転送能力をもとに, 利用するゲートウェイを選択する. ゲートウェイ情報に格納されるプレフィクスを利用して, インターナルノードはアドレスをゲートウェイから取得する.

情報の取得方法に関しては, 利用しているインターフェースにより異なる.

表 4.1: ゲートウェイ情報

情報名	概要	動的な情報
アドレス	ゲートウェイの持つ, インターネットに接続している, 各インターフェイスが持つ IP アドレス.	○
プレフィックス	ゲートウェイが持つ移動ネットワーク内のプレフィックス.	○
インターフェイスタイプ	インターフェイスの種類. Ethernet, 無線 LAN や携帯電話などがある	×
リンク状態	インターフェイスの接続状況. 無線通信インターフェイスの場合, 電波強度など	○
帯域	インターフェイスの利用可能帯域	×
利用度	ゲートウェイを利用しているノード数や, 利用されている帯域など	○
CPU 能力	ゲートウェイの CPU 能力もパケット転送性能に影響する	×
CPU 使用率	現在どれだけ CPU が利用されているか	○

4.3.6 ゲートウェイ選択機構の設計

ゲートウェイ選択機構は, ゲートウェイ情報共有機構により, 取得したゲートウェイ情報データベースから, 実際に通信に利用するゲートウェイを選択を行なう.

選択したゲートウェイを利用する方式は, インターナルノード・ゲートウェイ間のトポロジにより 2 つの方式がある. インターナルノードとゲートウェイの間が 2 ホップ以上, つまり両者が

別々のネットワークに接続している場合, インターナルノードはRouting Header を利用してゲートウェイを利用する必要がある. Routing Header にゲートウェイのアドレスを格納することにより, ゲートウェイを経由して終点アドレスに到着するよう送信元において, 経路を制御することが可能である.

本研究で仮定しているような, インターナルノードとゲートウェイが 1 ホップ, つまり双方が同じネットワークに接続している場合, インターナルノードが送信元アドレス選択 (Source Address Selection) を行なうことにより, 利用されるゲートウェイが決定される. ゲートウェイが複数存在している場合, 内部ネットワークの計算機は, それぞれのゲートウェイからアドレスを取得し, マルチホーム状態となっている. IPv6 では, 利用したいゲートウェイから取得したアドレスを始点アドレスとして利用することにより, デフォルトでの送信先が決定される.

また, 複数のゲートウェイを同時に利用するため, 通信の種類ごとに利用するゲートウェイを変える機構が必要である. 通信先のアドレスや, ポート番号ごとに利用するゲートウェイを選択する. つまり, 通信ごとに利用する送信元アドレスを変化させる. 計算機が, どのようにゲートウェイの選択を行なうかは, ユーザの設定により決定される. 本研究では, ユーザがどのようにゲートウェイの利用方法を決定するかについては言及しない.

4.4 アドレス自動設定機構の設計

ゲートウェイが移動がすることにより, 移動ネットワークが接続するネットワークが変化する. インターネットから移動ネットワークへ, 直接通信を行うためには, インターナルノードのアドレスが接続先のネットワークから通信可能である必要がある.

解決手法としては, Open Shortest Path Fast Routing Protocol for IPv6(OSPFv3) [26] や, RIPng [27] などの動的経路制御プロトコルを利用して, ゲートウェイが移動する度に, インターネットでの経路表を変更する手段も考えられる. しかし, 本研究では, 飛行機や電車などの内部で形成される, 高速で広範囲を移動する内部ネットワークも想定している. このような, 移動ネットワークが多数存在することを考えると, 動的経路制御プロトコルによる解決は, インターネット全体に対する影響が大きい.

MGMN においては, NDP への改良を行い, アドレス自動設定機構を実現する. ゲートウェイは新しいネットワークへ移動すると, そのネットワークのゲートウェイに対して, プレフィクスのリクエスト (プレフィクス要求メッセージ) を送信する. リクエストを受け取った上位ゲートウェイは, 移動ネットワークのゲートウェイに対して, 応答 (プレフィクス委託応答メッセージ) として, プレフィクスを送信する. 上位ゲートウェイは同時に, 送信したプレフィクスへの経路を設定する. このゲートウェイ間の通信は, NDP の Router Solicitation メッセージと, Router Advertisement メッセージにより行なわれる.

第5章　MGMNの実装

5.1　実装環境

MGMN の実装環境について述べる．MGMN は NetBSD [28] 1.5.2-RELEASE 上で実装した．また, NetBSD 1.5.2-RELEASE 上では, KAME プロジェクト [29] により実装された IPv6 スタックが動作している．

5.2　Mobile IPv6 と複数インターフェース通信機構の利用

本研究においては, 文献 [13] で実装された複数インターフェース通信機構を利用する．この機構は Mobile IPv6 をもとに実装されているため, インターナルノードに対して移動透過性および着信可能性を提供することができる．

また, 複数インターフェース通信機構では, ユーザに設定されたポリシにより, 利用する CoA を切り替えるポリシルーティング機構を持つ．このポリシルーティング機構の利用により, 複数のゲートウェイを切り替えることが可能になる．

複数インターフェース通信機構では, CoA の切り替えによって, 利用するインターフェースを選択している．しかし, MGMN では, 1 つのインターフェースが複数のゲートウェイに接続する環境を想定している．現在の複数インターフェース通信機構では, 単一のインターフェースが, 複数のゲートウェイからアドレスを取得している環境をサポートしている．CoA 選択機構を利用することにより, 通信ごとのゲートウェイの切り替えを行うことが可能である．

5.3　ゲートウェイ情報

ゲートウェイの情報は図 5.1 で示すデータ構造に収められ, インターナルノードに送信される．GWINFO_H ヘッダ構造体と, インターフェースごとの情報を格納する IFINFO 構造体で構成される．

GWINFO_H の msg_type には, NEW_EMN, NEW_IF, IF_DOWN がある．それぞれ, 新たにゲートウェイになった時, すでにゲートウェイであるが, 新しい通信インターフェースが利用可能な時, 通信インターフェースが利用不可になった時に送信される．length にはゲートウェイ情報全体の長さが入る．IFINFO 構造体は固定長なため, インターナルノードは length により, ゲートウェイが持つ通信インターフェースの数が特定できる．

ifname はそのインターフェイスの名前, gw_addr と prefix_len はインターフェイスが持つアドレスに関する情報が格納される．本実装においては, ユーザがゲートウェイが持つ ifname を指定することにより, ゲートウェイの選択を行なう．この ifname は, NetBSD で利用されるデバイスの名称である．このため, 各ゲートウェイは外部インターフェイスのインターフェイス名を送信する．

```
typedef struct {
    u_short         msg_type;
    u_short         length;
} GWINFO_H;


typedef struct IFINFO {
    char            ifname[IFNAMSIZ];
    struct in6_addr gw_addr;
    u_short         prefix_len;
    u_short         ifbw;
} IFINFO;
```

図 5.1: ゲートウェイ情報構造体

5.4 モジュールの実装

MGMN の各機能は, 全てユーザランドのデーモンとして実装を行なった. ここでは, デーモンの持つ各機能の実装について述べる.

5.4.1 ゲートウェイ情報共有機構の実装

ゲートウェイ情報のフラッディングには, Versatile Flooding Database System(VFDBS) [30] を利用する. VFDBS では, Adjacency Node Communication Interface(ANCIF) により通信インターフェイスの抽象化を行っており, 隣接ノード間の通信方法に依存しないフラッディングを行なうことができる. 本研究においては, 移動ネットワークの構成について, 制限を設けない. このため, ネットワークのトポロジーに依存しないフラッディング機構を利用する必要がある. VFDBS は, この要求を満たす唯一のフラッディング機構であったため, VFDBS を利用する. ゲートウェイ情報共有機構では, ゲートウェイ情報の取得および, 送受信を行なう.

ゲートウェイ情報送信処理

図 5.2 にゲートウェイ情報送信時の処理を示す. 斜線部分の vfdb_advertise は, VFDBS への API で情報をフラッディングを行なう関数である. ゲートウェイ情報共有機構は, 定期的に自分の持つインターフェイスの情報を検査する. 今回の実装では, 5 秒に 1 回の検査を行なっている. 外部に接続するインターフェイスの ifname を検査し, 外部接続インターフェイスが起動している場合には, そのインターフェイスの情報を, ifinfo_list に保持する. 既に ifinfo_list に保持している情報と一致すれば, 再度インターフェイスの検査を行なう. 新しい情報である場合, ifinfo_list に情報を挿入し, vfdb_advertise を利用して, 移動ネットワーク内に送信する.

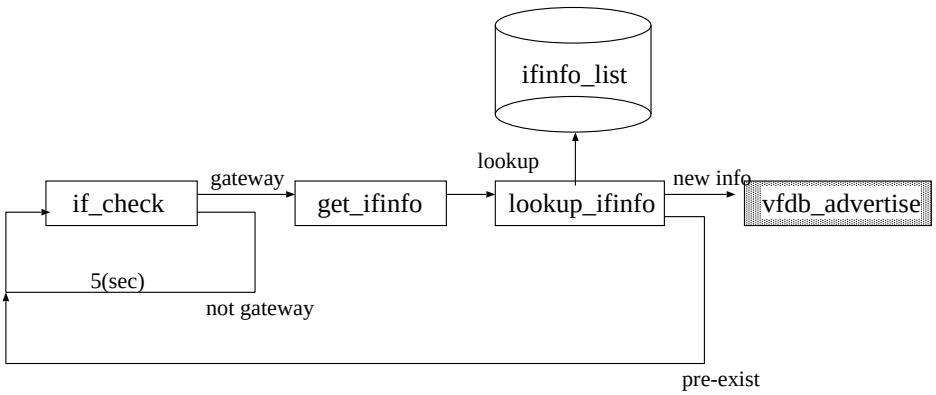

図 5.2: ゲートウェイ情報送信処理

ゲートウェイ情報受信処理

図 5.3 にゲートウェイ情報受信時の処理を示す. 斜線部分の vfdb_lookup は VFDBS への API であり, 受信した情報を取り出す関数である. また ioctl は複数インターフェイス通信機構におけるポリシ設定 API である. コマンドとして, SIOCS_MIP_POLICY を設定することにより, カーネル内にポリシを設定することが可能である.

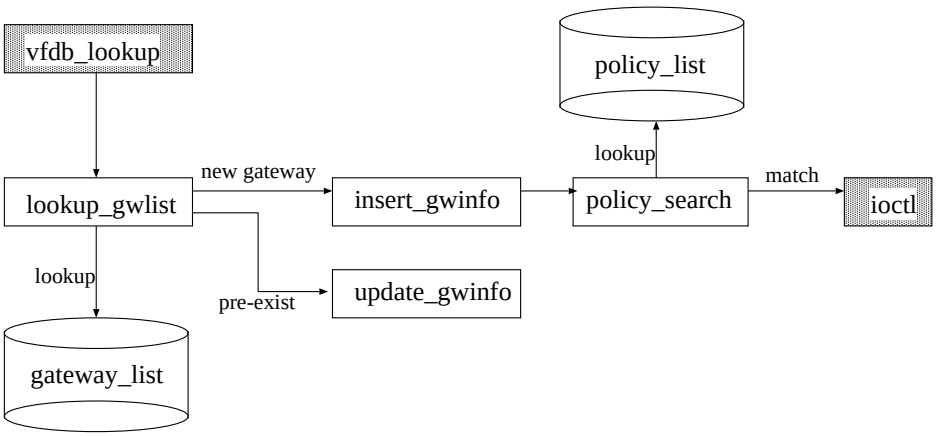

図 5.3: ゲートウェイ情報受信処理

vfdb_lookup によりゲートウェイ情報を受信したノードは, 現在保持している gateway_list と比較する. 受信したゲートウェイ情報が, 新規の情報であれば, gateway_list に追加する. また, 既にテーブルに存在するゲートウェイであっても, ゲートウェイ情報の type フィールドが NEW_IF か IF_DOWN であれば, ゲートウェイ情報を更新する. これらのメッセージは, 既知のゲートウェイに新しくインターフェイスが追加された時, および複数のインターフェイスの内 1 つが削除された時に送信される.

新しくゲートウェイを追加する時には, ioctl により SIOCS_MIP_POLICY コマンドを発行する. カーネルに対し, 設定するポリシを通知する. ポリシの削除を行なう時は, SIOCD_MIP_POLICY コマンドを発行することにより, カーネルからポリシの削除を行なう.

5.4.2 ゲートウェイ選択機構の実装

本実装においては, ゲートウェイ選択時の送信元アドレス選択機構は, 複数インターフェイス通信機構で実装された CoA Selection 機構およびポリシルーティング機構を利用して実現する. 複数インターフェイス通信機構では, 送信先アドレスごと, 送信先ポートごと, プロトコルごとのポリシを設定する. 通信の種類と, 利用するインターフェイスの対応付けをポリシとして保持する. それに従った CoA を利用することにより複数インターフェイスの同時利用を実現している. 本研究においては, 複数インターフェイスではなく, 単一のインターフェイスが持つ複数の CoA の選択を行なう.

本実装では, ポリシルーティング機構を利用してゲートウェイの切り替えを行なうため, ポリシ設定ファイルを用いた. 図 5.4 にその設定ファイル例を示す. 送信先アドレス, 送信先ポート, 利用プロトコルごとに, 利用したいゲートウェイの外部インターフェイスを指定する. この設定ファイルは起動時に読み込まれ, UPOLICY 構造体に保存される.

```
dstaddr=''3ffe:aaa:bbb:ccc::1'':ifname=wi0

dstport=22:ifname=fxp0

protocol=6:ifname=fxp0
```

図 5.4: ポリシ設定ファイル

図 5.5 に UPOLICY 構造体を示す. ポリシ情報は, next に次のポリシ情報へのポインタを持ち, リンクされる.

```
typedef struct UPOLICY{
        u_short                 pltype;
        u_short                 priority;
        struct UPOLICY          *next;
        union{
                struct in6_addr dst_addr;
                u_short dst_port;
        }data;

} UPOLICY;
```

図 5.5: ユーザポリシ構造体

ゲートウェイ選択機構は, 新しいゲートウェイ情報を受信する度に UPOLICY 構造体のリストを ifname をキーとして検索する. 一致した UPOLICY 構造体が存在した場合, ゲートウェイのプ

レフィクスとポリシを, ioctl を用いてポリシルーティング機構に設定する.

5.5 アドレス自動設定機構の実装

内部ネットワークでのアドレス自動設定機構は, NDP における Router Solicitation メッセージおよび Router Advertisement メッセージをもとに実装した.

ゲートウェイは接続先の外部ネットワークの上位ルータに対して, P フラグを立てた Router Solicitation メッセージを送信する. このメッセージにより, 上位ルータにプレフィクスの委託を要求する.

図 5.6 がプレフィクス委託要求メッセージフォーマットである. 変更点は, 予約されていたフィールド (Reserved) に 1 ビットの P フラグを追加した.

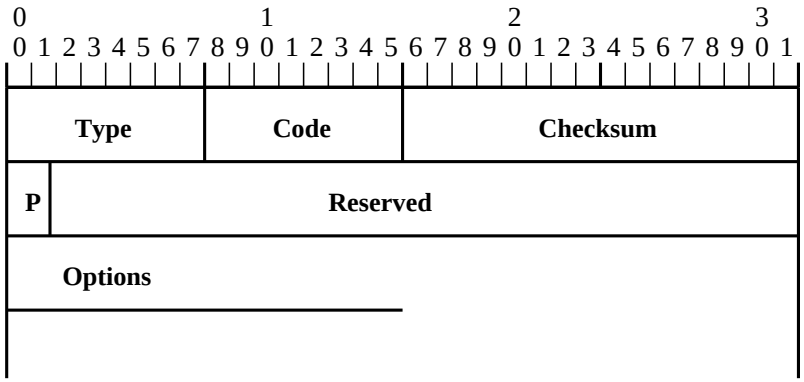

図 5.6: プレフィクス委託要求メッセージフォーマット

プレフィクス要求メッセージを受け取った上位ルータは, 自分の持つ委託応答のためのアドレスブロックを検索し, 利用可能なプレフィクスを選択する. そして, 送り元に対して, プレフィクス委託応答メッセージを送信する. このプレフィクス委託応答メッセージは, Router Advertisement メッセージに D フラグを立ててユニキャストで送信される. ユニキャストでの Router Advertisement メッセージは, 他の機構では必要ないため, 利用されていないが, 仕様では禁止されていない.

図 5.7 がプレフィクス委託応答メッセージフォーマットである. オプション部分 (options) に, 委託されるプレフィクスが格納される.

また, プレフィクス委託応答メッセージを送信した上位ルータは, そのプレフィクスへの経路を設定する. プレフィクスへの経路を, 委託したゲートウェイに設定する. 本実装においては, 静的な経路設定を行なう.

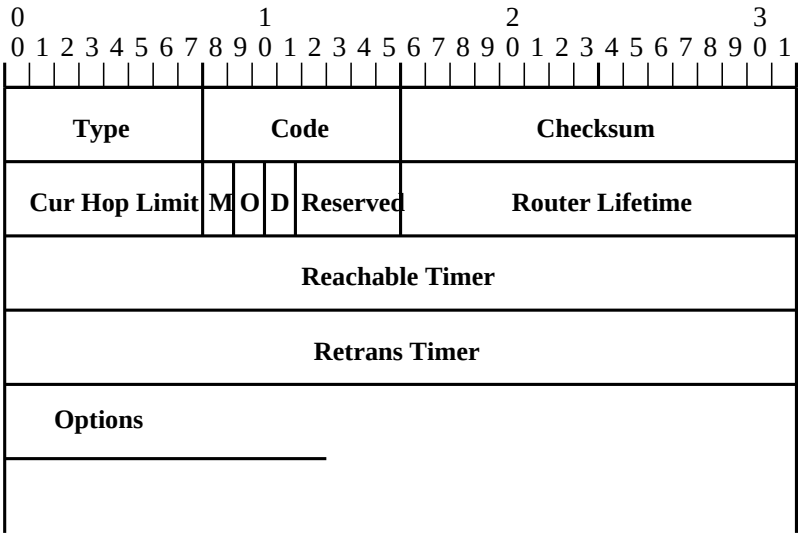

図 5.7: プレフィクス委託応答メッセージフォーマット

第6章　評価

6.1　MGMN の定性的評価

本研究により実現された MGMN システムの有効性の評価を行なう.

MGMN システムの実現により, 複数の移動計算機によるネットワーク内で, ゲートウェイの存在を共有し, 複数のゲートウェイを選択して利用する機構が実現された. MGMN システムは以下のような機能を提供する.

- 移動透過性・着信可能性の提供
- 複数の接続性の利用
- 動的な接続性への対応
- 動的な集合の形成

これらの機能により, 複数の移動計算機による協調通信機構の実現することが可能である. 複数の移動計算機による協調通信機構により, インターネットへの接続性の共有が可能となり, 接続性を持たない計算機に対して, 接続性を提供することができた.

6.2　MGMN の性能評価

MGMN における各処理にかかるコストを測定し, MGMN の有効性を示す.

6.2.1　ゲートウェイ情報共有にかかるタイムラグ

あるゲートウェイの情報が変化してから, それが内部ネットワーク内で共有されるまでの時間を測定する. このタイムラグが大きい場合, 受信したゲートウェイ情報が既に実際のゲートウェイの状態と異なる可能性がある.

測定には gettimeofday 関数を利用した. 計算機の仕様は, ゲートウェイの CPU が Celeron 500(497.86)MHz メモリが 192M バイト. インターナルノードの CPU が Celeron 333(331.61)MHZ メモリが 128M バイトである. また, ゲートウェイおよびインターナルノードは, 100BaseTX の Ethernet で同一セグメントに接続されている.

今回の測定では, ゲートウェイ 1 台, インターナルノード 1 台の構成である. ゲートウェイがインターフェースの情報を取得してから, VFDBS を利用して送信するまでの時間を送信コスト. インターナルノードの VFDBS が情報を取得してから, 実際にゲートウェイテーブルに保存されるまでの時間を受信コストとする. また, ゲートウェイ・インターナルノード間の Round Trip Time(RTT) も測定する.

測定結果を表 6.1 で示す. ゲートウェイのインターフェースが転送可能になったことを示すゲートウェイ情報データを 20 回送信し, 平均をとった. 1 度の送信ごとに, 全てのテーブルを削除している. RTT の測定には, ICMPv6 Echo Request パケットを 20 回送信し, 平均をとった.

表 6.1: 各処理におけるコスト

	処理にかかるコスト (msec)
送信コスト	0.83
受信コスト	0.70
合計コスト	1.52
RTT	1.79

測定結果から分かる通り, ゲートウェイ情報の送信にかかるコストは, 0.83msec. 受信にかかるコストは 0.70msec である. これらの値は, RTT と比較しても無視できる値である. つまり, ゲートウェイ情報の共有までのタイムラグはほぼ, 内部ネットワークの RTT に依存することが分かる. 今回の測定で用いたネットワークの場合, ゲートウェイ情報は, ほぼリアルタイムに共有することができた.

6.2.2 情報共有のための通信によるオーバヘッド

MGMN においては, 内部ネットワーク内で, ゲートウェイの情報を共有するため, フラッディングを利用している. フラッディングでは内部ネットワーク全体に情報を送信する. このため, 情報共有のための通信が, 内部ネットワークを通過する通信を阻害する恐れがある.

ゲートウェイ情報共有のために送信されるパケットは, 図 6.1 のように構成される. IPv6 ヘッダおよび, フラッディング機構として利用している vfdbs により付加されるヘッダの後に, ゲートウェイ情報が格納される. 本研究における実装では, ゲートウェイ情報は 40 バイトに固定しているため, 1 度に送信されるパケットは 116 バイトになる. しかし, 送信されるゲートウェイ情報はより検討される必要があり, 情報のサイズも変化することが考えられる. 本研究における 40 バイトという数値は最低限の値である.

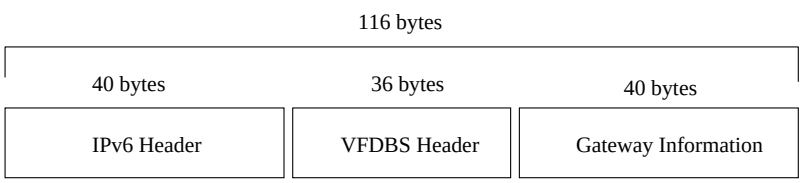

図 6.1: ゲートウェイ情報共有のために送信されるパケット

また, ゲートウェイ情報は 5 秒に 1 度, 送信される. これを内部ネットワーク内のゲートウェイの数を n, 送信されるゲートウェイ情報のサイズを $g(bits)$ とすると, ゲートウェイ情報の共有のために送信される 1 秒あたりのデータ量 $D(bps)$ は, 図 6.2 のように求められる.

この数式を実際の運用例にあてはめる. 自動車内での通信に利用することを例にあげる.

$$D = \frac{1}{5}gn \qquad (g > 928)$$

図 6.2: ゲートウェイ情報共有によるネットワークへの負荷

自動車内部の 4 人の乗客が移動計算機を利用して, インターネットへの接続を必要としている. この 4 人の内, 3 人がインターネットへの接続性を持っている. また, ゲートウェイは最低限の 116 バイトの情報を送信することにする. このような状況では, 555bps となる. このオーバヘッドの評価は, 内部ネットワークがどのように構成されているかに依存する. 例えば, 内部ネットワークが 100Mbps の Ethernet で構成されている場合, このオーバヘッドは全く無視できる.

6.2.3 動的な複数ゲートウェイの利用

本システムの利用により, 動的に出現する複数のゲートウェイを利用することが可能であることを示す.

測定環境

図 6.3 が測定ネットワークを示す. 2 台のゲートウェイと 1 台のインターナルノードで構成される, 同一セグメントのネットワークである. それぞれ計算機の仕様は以下の通りである. Internal Node および Correspondant Node(CN) の CPU が Celeron500 (497.87)MHz メモリが 319 MB. GatewayA の CPU が Pentium II450(451.02)MHz で, メモリが 128MB である. GatewayB の CPU が Intel Pentium III 700(701.63)MHz, メモリが 256MB である.

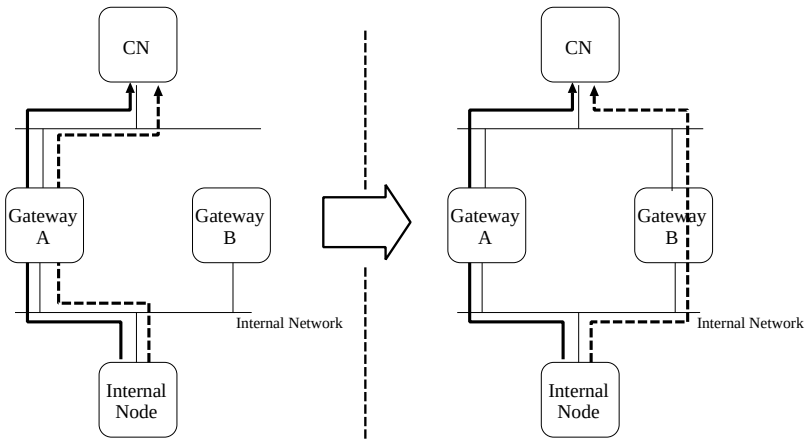

図 6.3: 測定環境

測定環境

測定は, 次の手順で行なった.

1. 初期状態では, Gateway1 の 1 台のみ接続されている.
2. インターナルノードから, 2 種類のフローを送信する.
3. もう 1 台の Gateway2 を接続する.
4. ゲートウェイの利用方法が変化し, それぞれのフローで利用するゲートウェイが変化するため, 2 つのゲートウェイから送信されることを確認する.

インターナルノードから送信する 2 種類のフローは, UDP と ICMP, UDP と TCP という 2 パターンである. これらのフローはそれぞれ特徴がある. TCP は輻輳制御機構を備えるため, 他のフローにより圧迫される. 逆に UDP は輻輳制御機構を備えず, 送信インターフェイスのバッファ最大まで送信しようとする. ICMP に関しては, 今回は ICMP のパケットの後方に, 1000 バイトのデータを格納して送信した.

測定結果

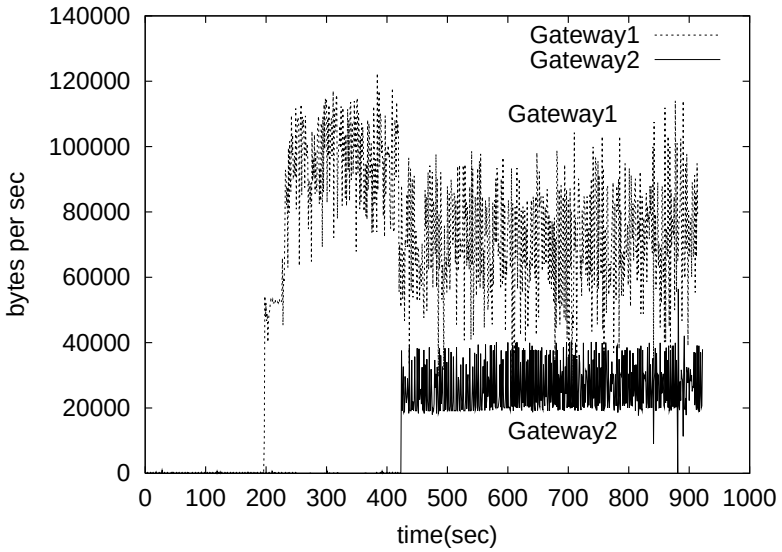

図 6.4: UDP と ICMP

図 6.4 に UDP フローと, 1000 バイトのデータを格納した ICMP フローを送信した場合の, 双方のゲートウェイでのスループットを示す. 200 秒時点から 400 秒時点までは, Gateway1 のみに対して, 2 つのフローを送信している. この区間では, UDP フローにより ICMP フローは送信されていない. しかし, 400 秒時点で, Gateway2 の存在が広告されると, ICMP フローを Gateway2 を利用して送信するよう切り替えるため, ICMP フローが Gateway2 を通過している.

図 6.5 が UDP フローと, TCP フローを送信した時の双方のゲートウェイでのスループットを示す. 700 秒の時点で GatewayB が接続され, TCP のフローが送信されている.

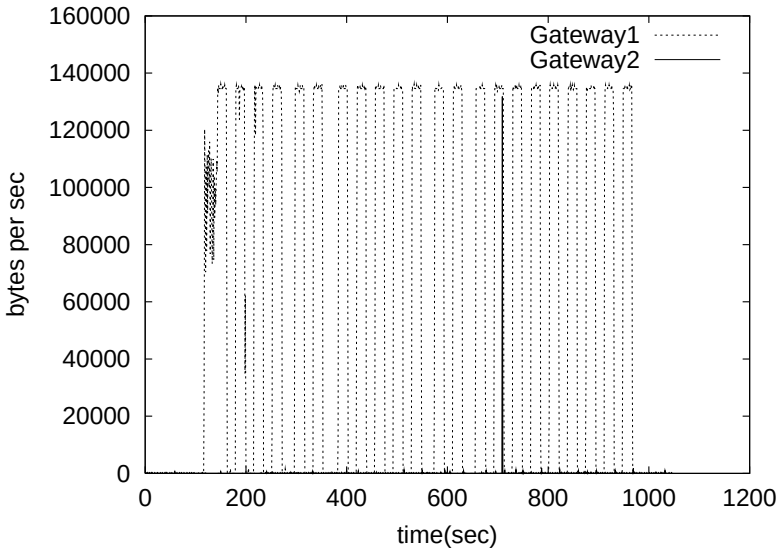

図 6.5: TCP と UDP

考察

2 パターンでの測定の結果, 利用するゲートウェイを, フローごとに選択できることが確認できた. また, ゲートウェイの情報が動的に広告されることにより, 利用するゲートウェイを変化させうることを示した. また, 本機構により, ポリシの設定によって, 複数ゲートウェイを効率的に利用することが可能であることが分かった. 複数のゲートウェイを利用して, データフローの負荷分散が可能である.

しかし, 問題も発覚した. 1 台の計算機が, 1 つの通信インターフェースから, 2 つのゲートウェイに向けて, 2 種類のフローを送信する場合, 通信は計算機のインターフェースにおいて, 混雑が発生する. 例えば, 図 6.5 のように, UDP と TCP のフローを送信する時には, 通信インターフェースを出る時に, TCP のフローは UDP に阻害されてしまう. この問題に関しては, 方法を変え, 評価・検討する必要がある.

第7章　結論

7.1　まとめ

本研究では, 複数の移動計算機による協調通信機構の実現を行なった. 本機構により, 一時的に集合した複数の移動計算機が持つ外部通信インターフェイスを, 集合内において共有して利用することが可能となった. 本機構では, 複数計算機による集合を, 一時的な移動ネットワークと捉え, 移動ネットワーク内で, ゲートウェイの情報を共有しする機能を提供する. これにより, 移動ネットワークにおいて, 複数のゲートウェイ利用を実現した. また, 複数ゲートウェイの利用にあたり, 各ゲートウェイを切り替え, もしくは同時に利用することを可能にした.

評価においては, ゲートウェイの状態変化を, ほぼリアルタイムに, ネットワーク内で共有できることを示した. 移動ネットワーク内でのゲートウェイ情報共有機構も, ネットワーク内の他の通信を阻害するものでは無いことを数式から示した. また, 実験ネットワーク上で動作確認を行ない, 動的に変化する複数のゲートウェイを利用することが可能であることを示した.

本研究では, 複数の移動計算機の集合内において, 近隣の他の移動計算機の持つ通信インターフェイスを利用することを実現した. これにより, 複数の計算機が互いにその通信環境を補完しあう, 複数の移動計算機による協調通信機構が実現された.

7.2　今後の課題

今後は以下のような課題にとりくむ必要がある. まず, 内部ネットワークの構成に関する課題である. 機能要件で示した, 集合内通信の汎用性に関しては, 評価を行なっていない. 本機構は様々なネットワークへの対応を想定して, 設計されている. しかし, 実際に他の形態のネットワークでの利用を検証する必要がある. 特に MANET による内部ネットワークの構築は重要である. MANET では, 内部ネットワークの構成も不安定であるなど, 他のネットワークとは違った特性を持つ. MANET への対応にあたっては, 考慮しなければならない点が多い.

また, 複数ゲートウェイの利用方法についても, 考察する必要がある. 共有するゲートウェイ情報の抽象化を行なうことにより, ユーザのゲートウェイ利用に関するポリシを, より一般的にすることが可能となる.

謝辞

本論文の執筆にあたりまして, ご指導いただきました慶應義塾大学環境情報学部教授 村井純博士, 並びに同学部教授 徳田英幸博士, 同学部助教授 中村修博士, 同学部助教授 楠本博之博士, 同学部専任講師 南政樹氏に感謝いたします.

研究の要所要所において, 大切な助言をくださった慶應義塾大学政策・メディア研究科講師 植原啓介氏, 同大学 SFC 研究所研究員 渡辺恭人氏, 同研究所訪問研究員 和泉順子氏に感謝いたします.

常に身近にいて, 絶え間なく尻を叩いてくださった慶應義塾大学政策・メディア研究科博士課程 湧川隆次氏, 修士課程 佐藤雅明氏に感謝します.

本システムの実装にあたり, 細かくサポートしていただいた, 慶應義塾大学政策・メディア研究科博士課程 今泉英明氏, 同小原泰弘氏, 同修士課程 川喜田佑介氏, 同有賀征爾氏, 同若山史郎氏に感謝します. また, 本研究を行うにあたって, 手助けしてくれた慶應義塾大学総合政策学部 小柴晋氏, 同大学環境情報学部 渡里雅文氏, 同久松剛氏にも感謝します.

慶應義塾大学 徳田・村井・楠本・中村・南合同研究室の皆様, 特に nacm 研究グループと, sing 研究グループの皆様に感謝します.

本当に皆様ありがとうございました。

最後に, DJ. MURO, YOU THE ROCK, RINO LATINA2 をはじめとする日本中の HIP-HOP Musician, 並びに岡村靖幸氏, 私が愛してやまない全ての Artist に感謝します。

参考文献

[1] I. Supplement, t IEEE, and S. Edition. Ieee standard 802.11b-1999 (supplement to ansi/ieee standard 802.11, 1999 edition), 1999.

[2] 'bluetooth sig, inc.'. http://www.bluetooth.org/.

[3] インターネット自動車プロジェクト. htt://www.sfc.wide.ad.jp/InternetCAR.

[4] モバイル ipv6@トレイン. http://www.nokia.co.jp/IPv6/train.html.

[5] 'internet its プロジェクト'. http://www.internetits.org/.

[6] モバイルインターネットサービス. http://www.miserv.net/.

[7] Boingo wireless, inc. http://www.boingo.com/.

[8] J. Postel. *Transmission Control Protocol*, September 1981. RFC 793.

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

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

[11] 國司光宣, 石山政浩, 植原啓介, 江原浩, and 寺岡文男. 縮退アドレスモデルに基づく IPv6 上移動透過プロトコルの設計と実装, Jul 2000.

[12] 'internet engineering task fource'. http://www.ietf.org/.

[13] Ryuji Wakikawa, Keisuke Uehara, and Jun Murai. Multiple Network Interface and Policy-Based Routing Support for Mobile IPv6, February 2001.

[14] Richard Draves. *Default Router Preference and More-Specific Routes*, May 2001. Work in Progress, draft-ietf-ipngwg-router-selection-00.txt.

[15] T. Narten, E. Nordmark, and W. Simpson. *Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6)*, December 1998. RFC 2461.

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

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

[18] David B. Johnson, David A. Maltz, Yih-Chun Hu, and Jorjeta Jetcheva. *The Dynamic Source Routing Protocol for mobile ad hoc networks*, March 2001. Work in Progress, draft-ietf-manet-dsr-05.txt.

[19] C. E. Perkins, E. M. Royer, and Samir R. Das. *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*, January 2001. Work in Progress, draft-ietf-manet-aodv-10.txt.

[20] Ulf Jonsson, Fredrik Alriksson, Tony Larssonm, Per Johansson, and Gerald QMaguire Jr. MIPMANET - Mobile IP for Mobile Ad Hoc Networks, 2000.

[21] Ryuji Wakikawa, Andres Nilsson, Antti J. Tuominen, Jari T. Malinen, and Charlie E. Perkins. Internet Connectivity for Mobile Ad hoc Networks, November 2001.

[22] Richard Draves. *Default Address Selection for IPv6*, September 2001. Work in Progress, draft-ietf-ipngwg-default-addr-select-06.txt.

[23] S. Thomson and T. Narten. *IPv6 Stateless Address Autoconfiguration*, December 1998. RFC 2462.

[24] IEEE. Guidelines for 64-bit global identifier(eui-64) registration authority. http://standards.ieee.org/regauth/oui/tutorials/EUI64.html.

[25] B. Haberman and J. Martin. *Automatic Prefix Delegation Protocol for Internet Protocol Version 6 (IPv6)*, Jul 2001. Work in Progress, draft-haberman-ipngwg-auto-prefix-01.txt.

[26] R. Coltun, D. Ferguson, and J. Moy. *OSPF for IPv6*, December 1999. RFC 2740.

[27] G. Malkin and R. Minnear. *RIPng for IPv6*, January 1997. RFC 2080.

[28] "netbsd project". htt://www.netbsd.org.

[29] "kame project". htt://www.kame.net.

[30] 今泉英明, 杉浦一徳, and 中村修. ノード間通信インターフェイスに依存しない汎用フラッディング機構の実現, October 2001.