

平成21年度 修士論文

邦文題目

IPv6におけるMobile PPCの実現と評価

英文題目

**The Realization of Mobile PPC in IPv6
Networks
and its Evaluation**

情報工学専攻

(学籍番号: 083430024)

寺澤 圭史

提出日: 平成22年1月29日

名城大学大学院理工学研究科

内容要旨

モバイル端末や公衆無線環境の普及に伴い、移動しながら通信を行いたいという要求が高まっている。しかし、IP ネットワークでは、通信中に端末がネットワークを移動することにより IP アドレスが変化すると通信が切断してしまう。この課題を解決するための機能を移動透過性と呼び、我々はこれまでエンドエンドで移動透過性を実現する通信プロトコルとして **Mobile PPC (Mobile Peer to Peer Communication)** を提案してきた。

一方、IPv4 グローバルアドレスの枯渇により今後 IPv6 の普及が必須となる。IPv6 では膨大なアドレス空間が存在するため、エンドツーエンドの通信が可能となる。移動透過性を P_v6 ネットワークで実現する場合においても、エンドエンド通信が維持できることが望ましい。そこで本稿では **Mobile PPC** の原理と特徴を活かしたまま、IPv6 ネットワークでも移動透過性を可能とする **Mobile PPC_v6 (以後、MPPC_v6)** の実装と性能測定を行ったので報告する。MPPC_v6 の実現にあたり、ハンドオーバー処理を工夫し、他方式に比べ高速な切替を可能とした。

ハンドオーバー処理は、L2 ハンドオーバー、移動検知、アドレス生成、重複アドレスチェック、L3 ハンドオーバー、通信再開に分かれており、本稿では移動検知と重複アドレスチェックについて検討を行った。移動検知とは、ネットワーク層とデータリンク層の機能がそれぞれ独立しているため、L2 ハンドオーバーと L3 ハンドオーバーの間の連携方法を検討する必要がある。本稿ではアプリケーションからデータリンク層とネットワーク層の両機能を制御する方式を用いることとした。重複アドレスチェック (**DAD; Duplicated Address Detection**) は取得したアドレスが他の端末と重複していないことを確認する機能で、一般にタイマより検出するため時間がかかる。これを解決するため、独自の工夫によりタイマに頼らない方式を考案した。それに伴い MPPC のネゴシエーションも一部改善を行った。

目次

第 1 章	はじめに	3
第 2 章	既存技術	5
2.1	Mobile IPv6	5
2.2	移動検知	6
2.3	Optimistic DAD	7
第 3 章	Mobile PPC の概要	9
第 4 章	Mobile PPCv6 の実現	11
4.1	要求仕様とその解決	11
4.2	移動検知	11
4.3	DAD 処理の短縮	12
4.4	CU ネゴシエーションの拡張	15
第 5 章	実装	16
5.1	カーネルにおけるモジュール構成	16
5.2	MPPC デーモン	17
第 6 章	性能評価	19
6.1	ハンドオーバー処理時間	20
6.2	DAD 処理時間	21
第 7 章	まとめ	23
	謝辞	25
	参考文献	26
	研究業績	27
付録 A	IPv6 の用語と解説	29
A.1	Router Advertisement	29
A.2	Router Solicitation	29
A.3	Neighbor Solicitation	29

A.4 Neighbor Advertisement 29

第1章 はじめに

モバイル端末や公衆無線環境の普及に伴い、移動しながら通信を行いたいという要求が高まっている。しかし、IP ネットワークでは、通信中に端末がネットワークを移動することにより様々な問題が生じる。TCP/IP の通信では IP アドレスとポート番号で通信を識別しているため、IP アドレスが変化すると通信が切断してしまう。また、通信を開始しようとしても移動により IP アドレスが変化してしまうと、宛先が特定できず通信を開始できないという課題がある。これらの課題を解決するための機能を移動透過性と呼び、様々な方式が検討されている [1]。

そこで、我々はこれまでエンドエンドで移動透過性を実現する通信プロトコルとして Mobile PPC (Mobile Peer to Peer Communication) [2] を提案してきた。Mobile PPC (MPPC) は、エンド端末だけで移動透過性を実現でき、特別な装置が不要であるという特徴がある。

一方、IPv4 グローバルアドレスの枯渇により今後 IPv6 の普及が必須となる。IPv6 では、IPv4 で用いられている NAT (Network Address Translator) のような装置が不要で、アドレスにグローバルやプライベートのような区別はない。すべての端末は一意性が保たれたグローバルユニークなアドレスを使用して、常にエンドエンドの通信が可能となる。このようなことから IPv6 ネットワークでは移動透過性を実現する場合においても、エンドエンド通信が維持できることが望ましい。

IPv6 では Mobile IPv6 (MIPv6) [3] と呼ばれる移動透過性技術が基本技術の一つとして存在する。MIPv6 とは、IPv4 の移動透過性技術、Mobile IP (MIP) [4] をベースとして IPv6 へ対応させた技術である。MIPv6 では HA (Home Agent) と呼ぶ装置が必要であるが、経路最適化機能が追加されたことによりエンドエンド通信を維持できる。その他の移動透過性を実現する技術として、LIN6 (Location Independent Networking for IPv6) [5] と MAT (Mobile IP with Address Translation) [6] がある。いずれもエンドツーエンドで移動透過性を実現することを可能としている。しかし、これらの技術はいずれも特殊な装置を必要とする課題は残っている。

それに対し、MPPC は特殊な装置を導入せずにエンドエンド通信を実現できるという特徴があり、IPv4 での実装・評価を終え、その有効性が証明されている。MPPC の原理は IPv6 にもそのまま適応可能である。そこで本稿では Mobile PPC の原理と特徴を活かしたまま、IPv6 ネットワークでも移動透過性を可能とする Mobile PPCv6 (以後、MPPCv6) を実現した。MPPCv6 の実現に当たって、ハンドオーバー処理を工夫し、他方式に比べ高速な切替を可能とした。ハンドオーバーの高速化においては、L2 ハンドオーバー、移動検知、

アドレス生成, 重複アドレスチェック, L3 ハンドオーバー, 通信再開の処理においてを, それぞれ検討が必要である. L2 ハンドオーバーはデータリンク層の動作になるため, 本稿では検討範囲から除外する. 移動検知とは, ネットワーク層とデータリンク層の機能がそれぞれ独立しているため, L2 ハンドオーバーと L3 ハンドオーバーの間の連携方法 [7] を検討する必要がある. 本稿ではアプリケーションからデータリンク層とネットワーク層の両機能を制御する方式を用いることとした. アドレスの取得方法および重複アドレスチェックにおいては, IPv4 と IPv6 で大きく異なる. IPv4 では DHCP によるアドレス取得や重複アドレスチェックに非常に多くの時間を要する. そのため, この課題については無線カードを 2 枚使用するハンドオーバー方式 [8] が提案された. 一方, IPv6 ではルータから広告されているネットワークプレフィックスから端末自身がアドレスを自動で生成するため問題にはならない. しかし, 重複アドレスチェック (DAD; Duplicated Address Detection) は取得したアドレスが他の端末と重複していないことを確認する機能で, 一般にタイムより検出するため時間がかかる. これを解決するため, 独自の工夫によりタイムに頼らない方式を考案した. それに伴い MPPC のネゴシエーションも一部改善を行った..

MPPCv6 の性能評価を行うために IPv6 無線ネットワークを構築して実験を行った. MPPCv6 を用いて L2, L3 ハンドオーバーを行った場合の各処理時間を測定した結果, 高速のハンドオーバーが可能になった.

以降, 2. で Mobile IPv6 とその課題, 3. で Mobile PPC 概要を説明する. 4. Mobile PPCv6 の実現, 6. 実装, 6. 性能評価を行い, 7. でまとめる.

第2章 既存技術

2.1 Mobile IPv6

既存技術として、IPv6 で標準搭載されている Mobile IPv6 をとりあげる。MIPv6 では MIP と同様に、通信開始時のネットワーク（ホームネットワーク）で取得するホーム・アドレス（HoA;Home Address）と訪問先ネットワークで取得する気付アドレス（CoA;Care of Address）の二つのアドレスを用いる。HoA は移動しても変化することがなく、アプリケーションは自端末のアドレスを常に HoA と認識する。また、ホームネットワークには HA が設置されており、移動後は HA を使用することで移動透過性を実現する。

2.1.1 Mobile IPv6 における双方向トンネル通信

図 2.1 に MIPv6 の概要を示す。ホームネットワークに存在する移動端末（MN;Mobile Node）が通信相手（CN;Correspondent Node）と通信中に異なるネットワークに移動した場合について示す。ホームネットワークに存在する MN は HoA を用いて CN と通信を開始する。通信中に MN が移動先ネットワークへ移動すると、新たに CoA を取得する。CoA を取得した MN は HA に対してバインディング通知（BU;Binding Update）を行い、HoA と CoA の関係が示されているバインディングキャッシュ（BC;Binding Cache）を更新する。このバインディング通知メッセージは盗聴やハイジャックを防止するために IPsec [9] による保護が必須となっている。BC を更新後、MN は送信元 HoA のパケットを送信元 CoA のヘッダでカプセル化して HA に送信する。それを受け取った HA はパケットをデカプセルして CN へ転送する。CN から MN への通信は上記と逆方向トンネルを用いてパケットを転送する。以上のように HA を介した双方向トンネルを用いることにより移動透過性を実現するが、以下のような課題もある。

MIP は HA の設置が必須であるため、各ネットワークに HA を設置することが前提となる。CN も移動することを考えると、CN 側にも HA が必要である。移動後の通信では HA を介した IPv6 双方向トンネルになるため、冗長経路と帯域消費が発生する。CN と MN の両端末がそれぞれのホームネットワーク以外の場所に移動した場合は、通信経路上で二つの HA を経由し、それぞれの HA との間でトンネルを形成しなければならない。過去の報告例を見ると、MIPv6 のハンドオーバ時における通信断絶時間はおよそ 5~6[s] とされている。これは L2 ハンドオーバと L3 ハンドオーバの連携方法が定義されておらず、移動検知に時間がかかることと、重複アドレスチェックに時間がかかることが要因となっている。

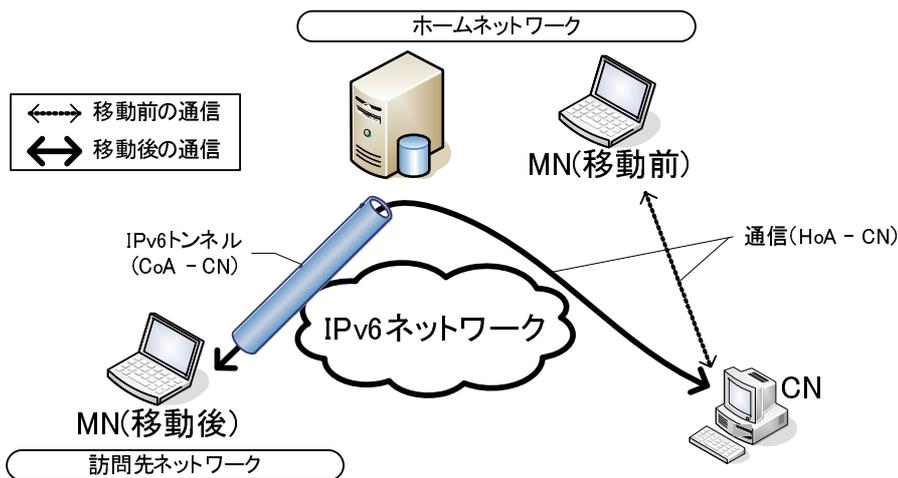


図 2.1 Mobile IPv6 の概要

2.1.2 経路最適化を用いたエンドエンド通信

MIPv6 ではリアルタイムな通信には経路最適と呼ばれる機能が定義されている。経路最適化とは HA を介したトンネル経路ではなく、エンドエンドで通信を行う機能である。経路最適化を行うにはモビリティヘッダと呼ばれる IPv6 拡張ヘッダが必要となる。MN がパケットを送信する場合、送信元 HoA から送信元 CoA に書き換え、モビリティヘッダに HoA を記述して CN に送信する。CN が受信するときは IP 層で送信元 CoA からモビリティヘッダに記述されている HoA に変換してアプリケーションに渡す。パケットを受け取った CN は送信元を CoA から HoA に書き換えてアプリケーションへ渡す。CN からパケットを送信する場合は宛先のアドレスを CoA に書き換え、モビリティヘッダに HoA のアドレスを記述して送信する。以上のような動作によりエンドエンドでの通信継続を可能とする。経路最適化を用いた場合、CN が移動した場合に発生した冗長経路はなくなるが、HA は必須である点は解決されていない。また、モビリティヘッダのためにパケットのオーバーヘッドも発生してしまう。

2.2 移動検知

L3 のハンドオーバーが行われる前には必ず L2 のハンドオーバーが発生する。MPPCv6 はネットワーク層に実装されたプロトコルであるため、L2 のハンドオーバーが発生したかどうかを知ることはできない。そのため、従来技術では L2 ハンドオーバーが完了した後にルータから定期的送信される RA に依存していた。ルータの標準設定では 3~10 秒のランダム値であるため、L2 ハンドオーバー完了後から数秒の遅延が必ず発生する。この遅延時間は RA の広告間隔である 3~10 秒となるため、移動透過性の通信において無視できない影響を与える。そこで、データリンク層とネットワーク層の機能制御、すなわち、L2 ハンドオーバーの発生をネットワーク層に通知する機構が必須である。

2.3 Optimistic DAD

2.3.1 DAD の概要

移動透過性を実現する技術では、ハンドオーバー時に迅速に通信を再開できることが望ましい。DAD [10] は NDP の機能一つとして実装されており、ICMPv6 パケットをベースに動作する。IPv6 アドレスには 3 つの状態、すなわち仮の状態を示す「Tentative」、有効な状態を示す「Valid」、無効な状態を示す「Invalid」がある。端末が新しいアドレスを生成してから約 1 秒間は状態が「Tentative」の状態となり、この間に DAD 処理を行うことになっている。状態が「Tentative」のときはパケットを受信することができないため、ハンドオーバー処理時間に大きな影響を与える。

2.3.2 Optimistic DAD

DAD 処理時間の課題を解決するため Optimistic DAD [11] と呼ばれる技術が存在する。Optimistic DAD とは、アドレスの状態として「Optimistic」状態を加え、NA パケットにも工夫を加えるものである。「Optimistic」状態のアドレスは限定的に「Valid」と同様に使用することが可能な状態で、DAD 処理終了後に「Valid」又は「Invalid」へ移行する。また、NA パケットにはオプションフィールドとして「Override」フラグ（O フラグ）が定義されている。O フラグが立っていればルータの NC エントリを強制的に上書きし、フラグが立っていなければ上書きをしない。通常の DAD 処理では、アドレスの状態が「Valid」の時のみ NA を応答するため、必ず O フラグが立っている。既存のエントリがない場合はエントリを新規作成する。

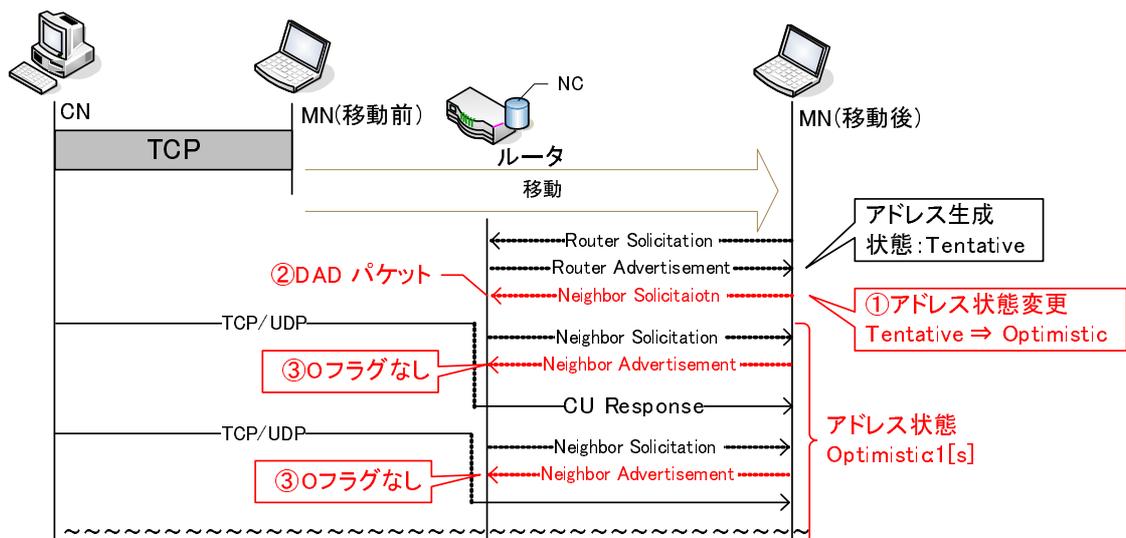
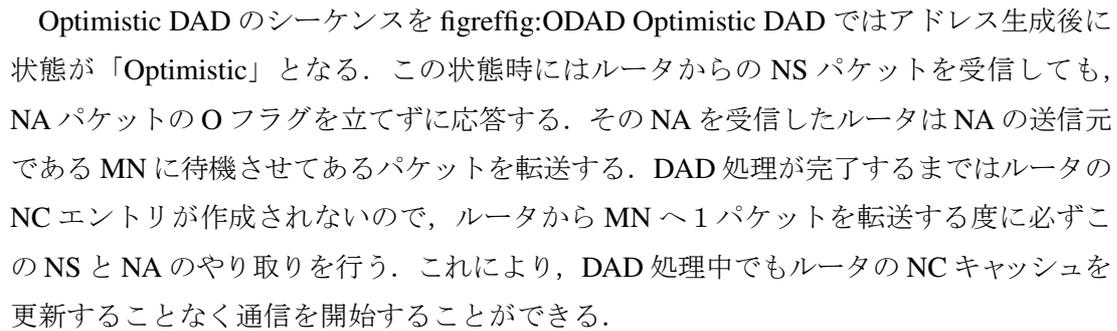


図 2.2 Optimistic の動作シーケンス

Optimistic DAD のシーケンスを ODAD Optimistic DAD ではアドレス生成後に状態が「Optimistic」となる。この状態時にはルータからの NS パケットを受信しても、NA パケットの O フラグを立てずに応答する。その NA を受信したルータは NA の送信元である MN に待機させてあるパケットを転送する。DAD 処理が完了するまではルータの NC エントリが作成されないので、ルータから MN へ 1 パケットを転送する度に必ずこの NS と NA のやり取りを行う。これにより、DAD 処理中でもルータの NC キャッシュを更新することなく通信を開始することができる。

しかし、この Optimistic DAD の課題は、ルータと端末の両方が対応していなければならない。多くの場合、ルータに Optimistic DAD が実装されていない。また、DAD の処理中は毎パケット毎に NS/NA のやり取りが発生するため、スループットが低下することが考えられる。

第3章 Mobile PPC の概要

本稿で用いる記号を以下のように定義する.

- A ; 端末の IP アドレス
- $A \rightarrow B$; A から B への通信
- $A \leftrightarrow B$; A と B 間の通信
- $A \Leftrightarrow B$; A から B , または B から A へのアドレス変換

Mobile PPC はエンド端末だけで移動透過性を実現する通信プロトコルである. 通信開始時における通信相手の IP アドレスの解決には DDNS (Dynamic Domain Name System) [12] を使用する.

IP ネットワークでは通信識別子として IP アドレス/ポート番号が用いられる. そのため, 移動して IP アドレスが変化すると, アプリケーションに対してアドレスの変化を隠ぺいする必要がある. MIPv6 ではカーネルでのトンネルやモビリティヘッダを用いてこれを実現していたが, MPPC ではカーネル内に作成したアドレス変換テーブルを用いて IP アドレスの変化を隠ぺいする. このため, パケット長が変化せず, オーバヘッドが発生しない.

図 3.1 に MobilePPC のシーケンスを示す. 通信開始に先立ち, Diffie-Hellman (以下 DH) 鍵交換を用いて共通鍵を共有する [13]. ネゴシエーション完了後, MN と CN には CIT (Connection ID Table) が IP 層に生成される. これは移動通知の相手認証のために用いられる. この時 CIT には通信開始時 (移動前) のコネクション識別子 CID (Connection ID) が記録されている. 通信中に MN がネットワークの移動するとアドレス自動生成により新しい IP アドレス C を取得し, CU (CIT Update) ネゴシエーションを開始する. CU ネゴシエーションでは移動後の CID を直接通知し合うことでお互いの CIT に移動後の CID を追加する処理を行う. まず, MN は移動後の IP アドレス C を通知するために CU Request を CN に送信する. CU Request には共通鍵より生成した MAC (Message Authentication Code) が付加されており, 盗聴やハイジャックを防ぐことができる. CN は CU Request の内容を認証後, 自らの CIT を

$$CIT: A \leftrightarrow \{B \Leftrightarrow C\} \quad (3.1)$$

のように更新する. 次に, CN は MN に対して CU Response を送信する. MN は CU Response を認証後, (3.1) と同様に自らの CIT を更新する.

図 3.2 に MPPC による移動後のアドレス変換処理について示す。CN から MN に対してパケットを送信する場合、上位層はアドレスが変化したことを知らず $CN \leftrightarrow MN$ の通信と認識しているため、移動前の IP アドレスでパケットを生成する。次に、IP 層で CU ネゴシエーションで更新された CIT に従い、移動後の $CN \leftrightarrow MN'$ に変換する。アドレス変換後のパケットは移動後の MN にルーティングされる。CN からのパケットを MN が受信すると IP 層で移動後の IP アドレスから移動前の IP アドレス $CN \leftrightarrow MN$ に変換して上位層に渡す。また、MN から CN へのパケットは逆の処理手順によりアドレス変換を行う。以上のようなアドレス変換処理を全ての通信パケットで行うことにより、通信を継続することができる。

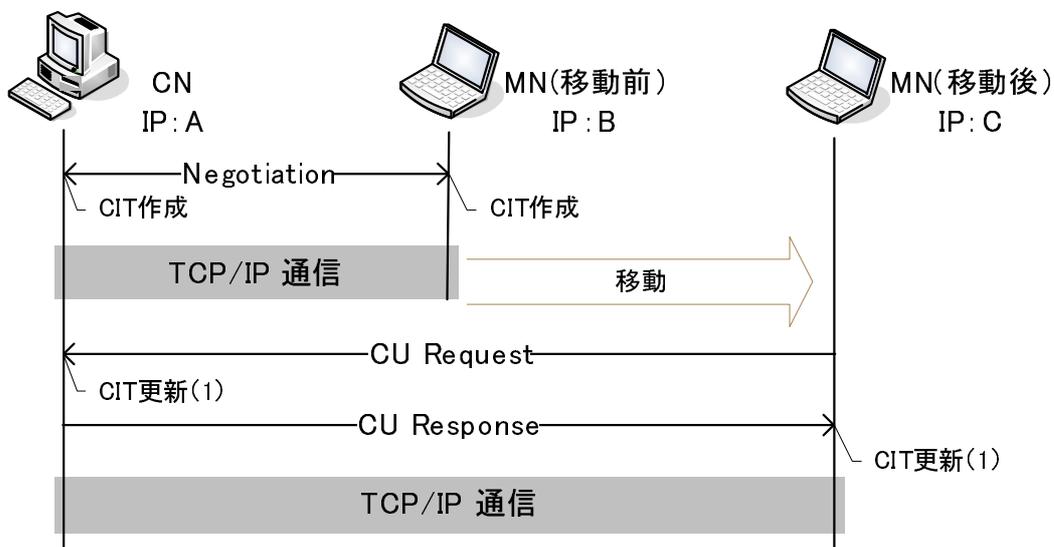


図 3.1 Mobile PPC の動作

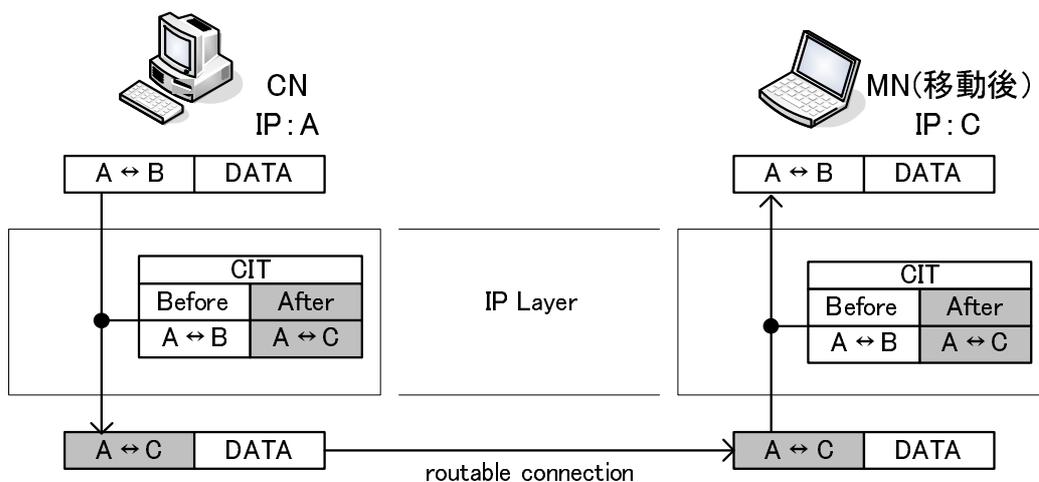


図 3.2 MPPCv6 におけるアドレス変換処理

第4章 Mobile PPCv6の実現

4.1 要求仕様とその解決

MPPCの基本部分については、アドレス体系と一部のパケットフォーマットの変更で移植可能であった。MPPCv6で新たな実装を行ったのはNDP (Neighbor Discovery Protocol) による重複アドレスチェックに関わる部分である。NDPはIPv4のARPに相当する処理で、IPv6ではICMPv6の機能として定義されている。DADの処理中には通信ができない状態となり、移動透過性の性能に大きく影響を与えることが分かった。DADの処理時間を大幅に短縮する機構をMPPCv6で独自に実装を行い、それに伴って移動通知処理であるCUネゴシエーションにも修正を加えた。また、端末の移動をアプリケーションで検知する方式を採用した。MIPv6などでは移動検知を行う際にルータから広告されるRouter Advertisement (RA) をトリガとしたネットワーク層の機能だけを利用している。ネットワーク層の機能のみを用いてハンドオーバを行った場合、RAを受信するまで時間は何もできずに遅延時間が発生してしまう。そこでネットワーク層とデータリンク層の制御機能を実装することで上記問題を解決する。

4.2 移動検知

MPPCv6ではアプリケーションに実装したMPPCデーモンによりデータリンク層の状態を監視し、L2ハンドオーバの発生をネットワーク層に伝えることでネットワーク層の機能を制御する。

図4.1に各層におけるハンドオーバ時の流れを示す。図4.1の左は移動検知機能がない場合であるが、L2ハンドオーバとL3ハンドオーバの間に大きな遅延時間が発生することが分かる。図4.1の右は、L3ハンドオーバのトリガとなるRAを端末側から要求することで遅延時間をなくす。すなわち、L2ハンドオーバの完了と同時にRSを送信するようにアプリケーションで制御を行う。この機能によってルータから広告されるRAの送信間隔に依存することなく高速な移動検知を可能とした。

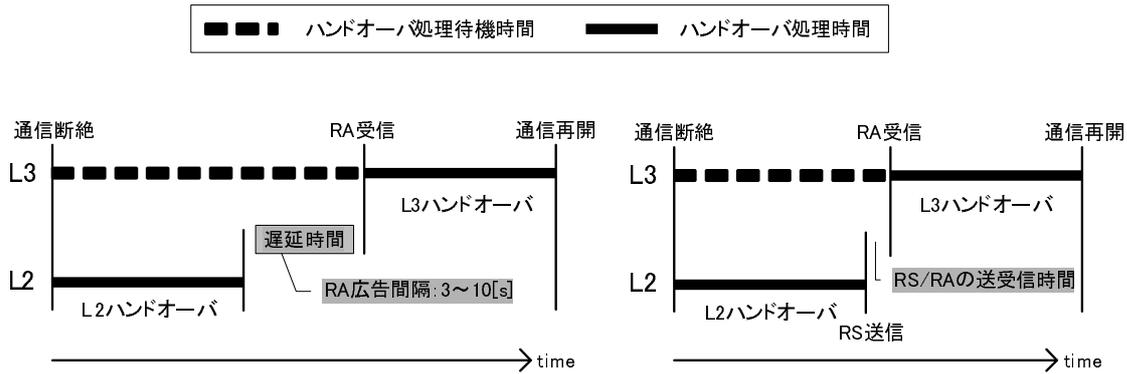


図 4.1 L2 ハンドオーバーと L3 ハンドオーバー間の遅延時間（左:移動検知なし，右:移動検知あり）

4.3 DAD 処理の短縮

4.3.1 DAD 処理概要

図 4.2 に DAD の処理シーケンスを MPPCv6 で移動後の通信を例にとって示す。MN はネットワークを移動するとルータから広告される RA に含まれるネットワークプレフィックスを用いて自らのアドレスを生成する。この時、生成されたアドレスの状態は「Tentative」である。アドレス生成後、CN に対してただちに CU Request を送信し、それを CN は受け取ることができる。CU Request を受けとった CN は CIT を更新して CU Response を返す。ここで CU Response をルータから MN に送信しようとしたとき、ルータには Neighbor Cache (NC) のエントリが存在しないため、エントリを生成するために MN に対して NS (Neighbor Solicitation) を送信する。ルータが持つ NC とは IPv4 の ARP キャッシュ相当するもので、IP アドレスと MAC アドレスのマッピング情報が記録されている。この時、MN のアドレスの状態が「Valid」であれば NC を更新するための NA (Neighbor Advertisement) を送信可能であるが、状態が「Tentative」であるため NA を送信できない。ルータは MN からの NA が戻らないため NS の再送を行うが、状態が「Valid」となるまでで CU Response を送り出せない状態となる。この間の通信は断絶状態となる。また、DAD 処理が完了するまでに MN から NS を送信しているが、これは MN が生成したアドレスが重複していないかをチェックするパケットである。もし他の端末がそのアドレスを使用していた場合、MN に対して NA の応答が返される。

4.3.2 Escaping DAD

MPPCv6 では、O フラグとアドレス状態を独自のタイミングで変更させることにより、DAD 処理時間を短縮する。また、Optimistic DAD のような状態は追加せず、既存の NDP システムに与える影響を最小限にした。以降、一連の処理をここでは EDAD(Escaping

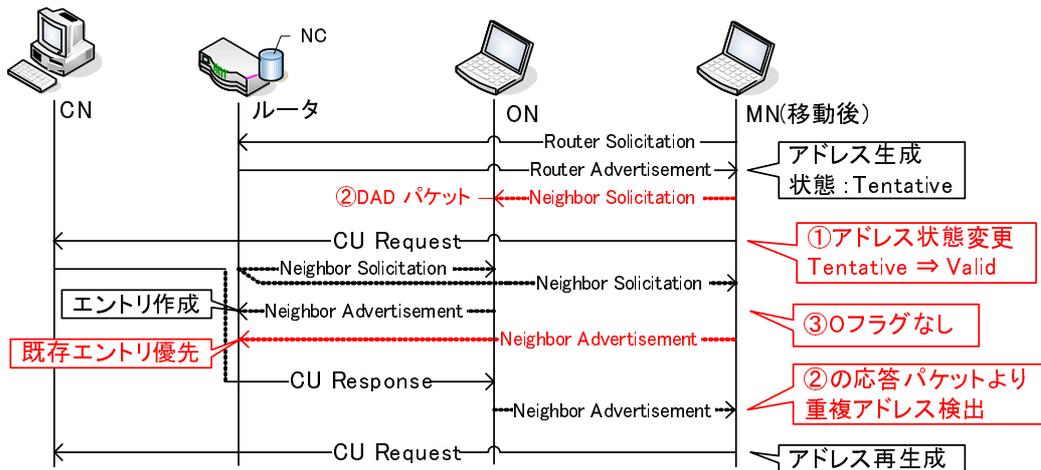


図 4.4 EDAD を用いた通信シーケンス (アドレス重複時)

する。この動作は(2)でアドレスの状態を「Valid」に変更させるため、MN から DAD のための NS パケットが送信されない。NS を送信しないと MN はアドレスが重複したかどうかを検知できないため、MPPCv6 独自で送信する。次に、CU Request 送信前にアドレスの状態を「Valid」に変更する。この動作により MN はルータから送信される NS パケットに対し、DAD 処理時間を待つことなく NA を応答することができる。NA を応答することで CN から CU Response パケットがルータから解放されるため、迅速に CU ネゴシエーションを完了することが可能となった。また、(3)でルータに応答する NA の O フラグは立てないが、ルータに MN の NC エントリが存在しないため新しいエントリが作成される。このような処理を行うことにより、DAD の処理を大幅に短縮することができる。

図 4.4 では MN が ON と重複したアドレスを生成した場合について示す。図 4.3 と同様に、MN はアドレス生成後、(1)と(2)の動作を行ってから CU Request を送信して、CN は応答として CU Response を返信する。ルータは CU Response パケットを受信後、NC のエントリが存在しないため、NS を ON と MN へ送信する。NS を受け取った ON は通常の NA をルータへ返信する。同時に、MN もルータへ NA を返信するが、NA パケットの O フラグを立てずに返信する。ルータは二つの NA を受信するが、MN からの NA には O フラグが立っていないため、ON のエントリが生成される。そのため、ルータからのパケットは必ず ON に届けられ、ON の通信を妨害することはない。ここで、CN からの CU Response も ON に転送されてしまうがことになるが、CU パケットは ICMPv6 をベースにしているため、ON の通信には影響を与えることがない。この場合、MN は独自で NS パケットを送信しているため、重複したことを知らせる NA が ON から返信される。そのパケットにより MN はアドレスの重複を知ることができる。MN は重複アドレスを検出すると、アドレスの再生成を行い、再度 CU ネゴシエーションを開始する。

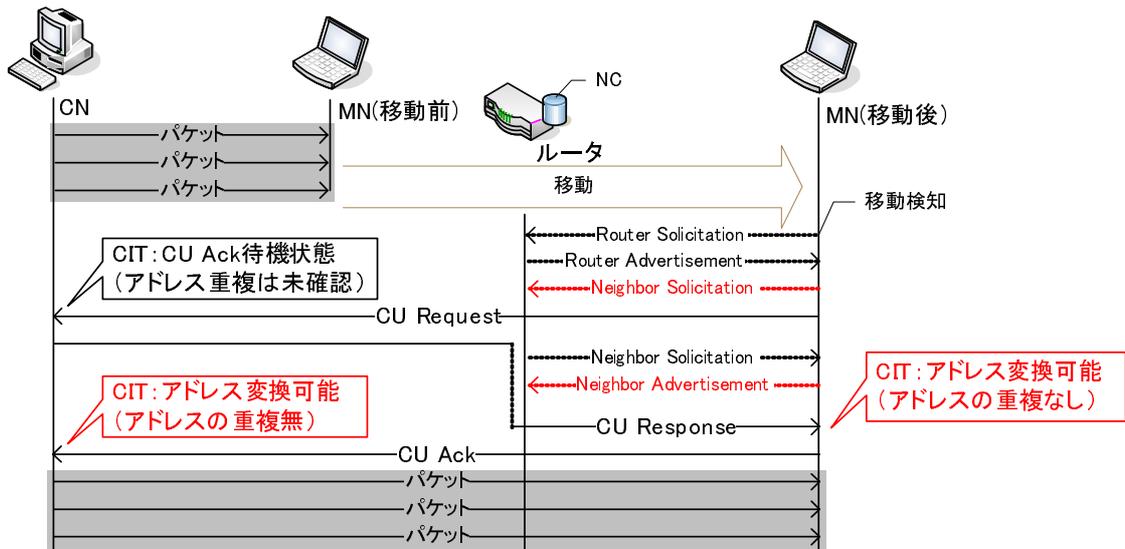


図 4.5 拡張した CU ネゴシエーション.

4.4 CU ネゴシエーションの拡張

EDAD の実装に伴い CU ネゴシエーションの拡張も行った。既存の MPPC では, CU Request を CN が受け取るとただちに CIT を更新してしまう。MN のアドレスが ON のアドレスと重複していた場合, MN 宛のパケットがすべて ON に届けられることになる。この状態で CN がパケットを送信すると, ON は予期しないパケットを受け取ることになり, ON の動作や通信を妨害する可能性がある。この課題を解決するために CU Ack メッセージを新たに定義して, CU ネゴシエーションを 3WAY に拡張する。

移動した MN が CU Request パケットを送信し, CN はそれを受信すると通常通りに CIT を更新するが, この時 CIT の状態をアドレス変換させないように CU Ack 待機状態に遷移させる。次に, CN は CU Response パケットを MN に送信することで MN は CIT を更新する。MN の場合は従来通りアドレス変換を行える状態である。最後に, MN は CN に CU Ack パケットを送信し, それを受けた CN は CIT をアドレス変換可能な状態に遷移する。もし, CU Ack が MN から応答されない場合は MN のアドレスが重複したと判断し, パケットを送信しない。以上のように CIT の状態遷移のタイミングをずらすことで, EDAD を用いても他の端末への影響はない。

第5章 実装

MPPCは現在メインシステム部分はIPv4スタックに実装されており、アプリケーション層には鍵生成やインターフェースの監視などのデーモンが実装されている。カーネルに実装されているメインシステムの大部分はIPv6スタックへそのまま移植が可能であるため、MPPCモジュールをIPv6に対応させた。しかし、IPv4では発生しなかったIPv6特有の課題があるので、それらについては新たな実装を行った。Mobile PPCはIPv4スタックへの実装と評価を完了しており、その有用性が証明されている。MPPCの原理と特徴を生かしたままFreeBSD7.0上のIPv6スタックにMPPCv6の実装および動作確認を行った。

5.1 カーネルにおけるモジュール構成

図5.1にMPPCv6のモジュール構成を示す。パケット受信時にはIP入力関数である`ip_input`から、パケット送信時には`ip_output`関数からMPPCv6モジュールを呼び出し、必要な処理を終えたら差し戻す形を基本とする。CIT管理モジュールではCITレコードの管理を行う。CITレコードへの動作は検索、生成、更新、削除がある。通信開始時には

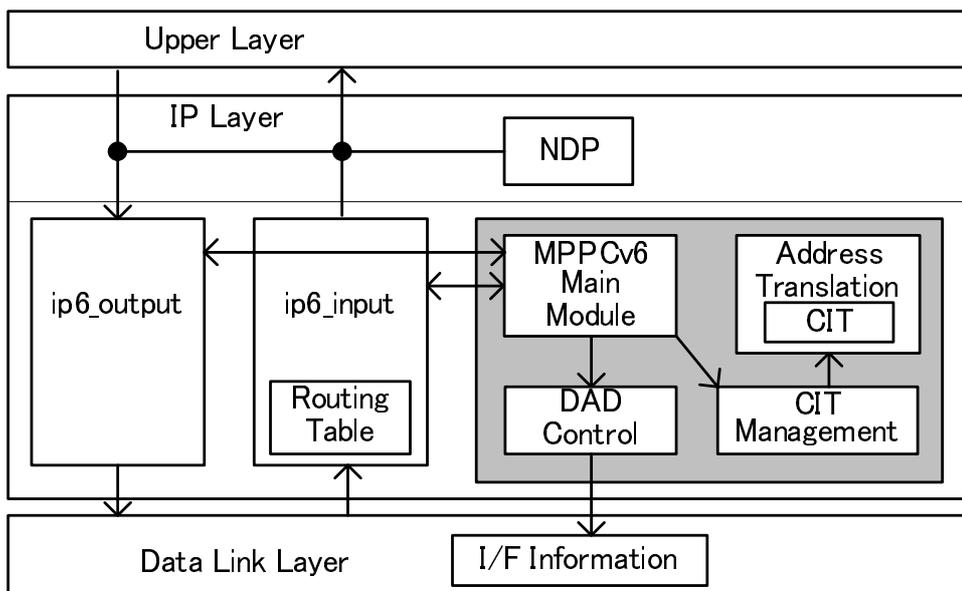


図 5.1 MPPCv6 のモジュール構成.

CIT にレコードが存在するかを検索し、なければアドレス変換を行わない状態の CIT を生成する。移動前の状態でもすべての通信パケットは MPPCv6 モジュールで CIT 検索を行うことになる。移動後の CIT が更新された状態では CIT を検索し、CIT レコードの情報に従ってアドレス変換を行う。この時、アドレス変換に伴ってチェックサムも変化するため、TCP または UDP チェックサムの再計算をする。また、通信が一定時間されな場合はその CIT レコードを削除する。端末移動時には CU ネゴシエーション処理と、そのネゴシエーションに伴って CIT レコードの更新を行う。

MPPCv6 では新たに DAD 操作モジュールを追加した。DAD 操作モジュールでは、本稿で述べた EDAD における重複アドレスチェックのコントロールを行う。データリンク層にはインターフェース情報が保持されており、その中にはアドレスに関する情報も含まれる。アドレスに関する情報にはアドレス状態を示すフラグが定義されているため、必要に応じて DAD 操作モジュールが操作する。アドレスの取得取得直後にはフラグが「Tentative」を示しているため、「Valid」に変更する。このフラグの書き換えで DAD 処理を省略（DAD 機能オフ）することができる。また、DAD 処理回避方式の動作中にルータへ応答する NA の O フラグの書き換えや MPPCv6 独自の NS パケットの送信もこのモジュールで行っている。

5.2 MPPC デーモン

図 5.2 に移動検知システムモジュール図を示す。L2 ハンドオーバーが発生すると、インターフェースのリンク状態が変化する。ネットワークを離脱する場合には「リンク切断」、ネットワークに参入する場合は「リンク接続」となる。このようなインターフェースの状

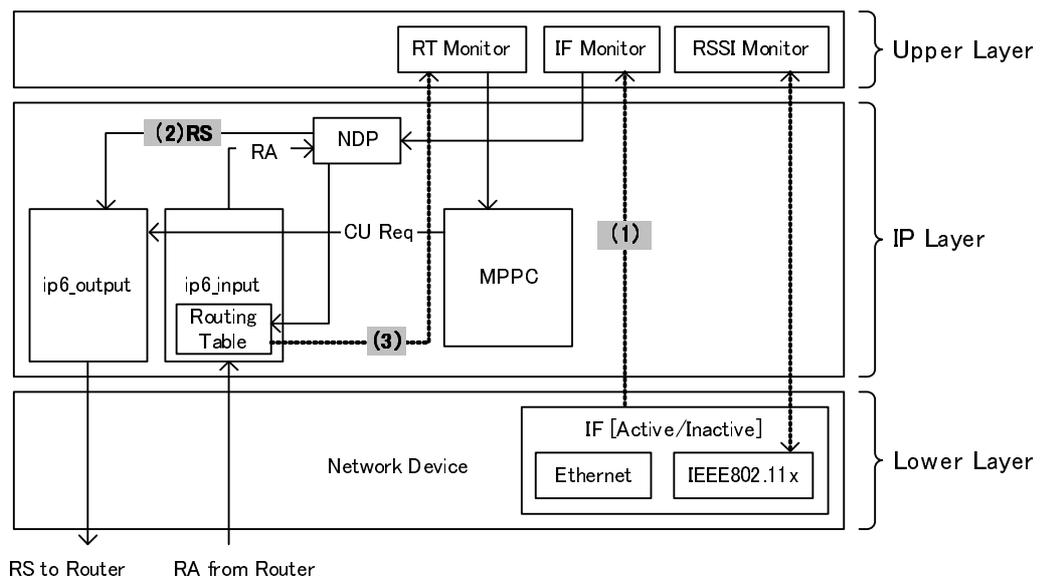


図 5.2 移動検知モジュールの実装.

態を監視することにより、端末側から RS を送信することでルータから RA を受信することが可能となる。(1)より、IEEE802.11X であれば無線 AP に接続されているかどうかを監視する。L2 ハンドオーバーが開始されると、最初に「リンク切断」の状態となり、その後、新しい AP とのアソシエーションが完了すると「リンク接続」の状態になる。MPPC デーモンはこのような状態変化を検知すると、異なるネットワークに移動したかどうかを判断するための RS を送信する(2)。この機能により移動検知のトリガとなる RA をただちに受信することができるため、定期的に広告される RA に頼る必要がない。もし、ネットワークを移動していれば新しいアドレスを生成し、ルーティングテーブルへ新しい IP アドレスが追加される。この処理を(3)のルーティングテーブル監視機能により取得し、カーネルの MPPC モジュールへ CU Request 送信要求を行う。このような MPPC デーモンの実装を行うことで、ルータの RA 広告間隔に左右されることなく高速で安定した移動検知が可能となった。

第6章 性能評価

MN と CN に実装された MPPCv6 の性能を計測するために、ネットワークトラフィックの生成ツールである iperf を用いて TCP 通信を行った。実験環境を図 6.1 に示す。IPv6 ルータ 3 台を用いて IPv6 ネットワークを構築し、R2 と R3 には無線 AP2 と AP3 をそれぞれ接続する。無線の規格には 802.11a を用い、セキュリティや認証機能はオフとした。11a を選択した理由としては他の AP の電波干渉を極力さげ、安定したハンドオーバーを行うためである。MN は無線接続を AP2 から AP3 へ切り替えることにより無線ハンドオーバー実験を行った。AP の切替は、ボタン入力で事前に設定した AP に切り替えられるようにしておいた。本実験に用いた各装置の仕様を表 6.1 に示す。また、通信断絶から通信開始までに要する時間、すなわち通信断絶時間を図 4.3 のシーケンスから以下のように分ける。

1. L2 ハンドオーバー (通信断絶～RS 送信)
2. アドレス生成 (RS 送信～NS 送信)
3. CU ネゴシエーション (CU Req 送信～CU Res 受信)
4. 通信再開 (CU Res 受信～通信再開)

通信断絶時間の定義は、MN が最後に受信また送信したパケットの時間からハンドオーバー終了後に受信した最初のパケットとする。通信切断時に発生する TCP 再送パケットは除外する。

表 6.1 装置仕様

	MN	CN
CPU	Core Duo U2500 1.2GHz	Pentium 4 3.0GHz
Memory	1014MB	512MB
NIC	Intel 3945ABG	100Base-TX
OS	FreeBSD 7.0	FreeBSD 7.0

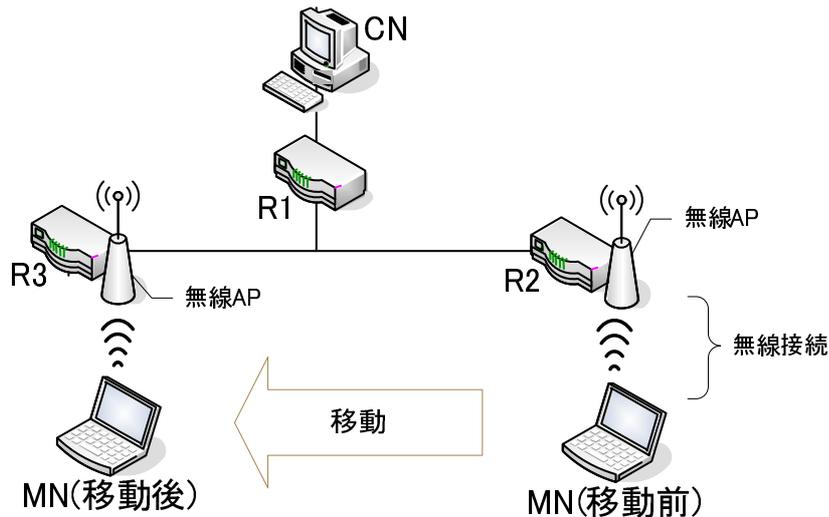


図 6.1 システム構成.

6.1 ハンドオーバー処理時間

CN から MN に対して 10 秒間の TCP トラフィックを送信し、MN を R2 から R3 へ移動させた。この場合における MN の通信断絶時における各ハンドオーバー処理時間を表 6.2 に示す。MPPCv6 を用いて通信を継続した場合、ハンドオーバー処理時間の合計は約 3[s] という結果が得られた。(1) の処理は通信断絶中の処理の中でも全体の 3 分の 2 を占めており、約 2[s] の時間を要する。文献 [14] では無線 AP の切替は 50~400[ms] になると推測していたが、倍以上の時間がかかってしまった。(2) の処理では IPv4 の DHCP に要する時間に比べ、IPv6 のアドレスの取得時間は大幅に短くなっている。

IPv6 の、DHCP のようなシーケンスがなく、相性による遅延もない。DHCP では 2 往復のシーケンス (DHCP DISCOVER, DHCP OFFER, DHCP REQUEST, DHCP ACK) の後に、Gratuitous ARP により重複アドレスチェックを行う。アドレス取得完了までには最低 2~5[s] ほど時間を要し、OS と DHCP サーバの相性により数十秒の時間要することもある。それに比べ、IPv6 のアドレス自動生成は標準機能であるため、相性などの問題もなく、アドレス取得に要する時間は極めてすくない。IP アドレスの取得部分に関しては予測通りの結果が得られている。また、MN が RS を送信してルータから RA の応答がされるまでの時間にばらつきがみられた。最も速い場合で 90[ms]、最も遅い場合では 450[ms] となった。これは、ルータが RA を応答する間隔がある設定された値の間からランダムに決定される仕様のためだと考えられる。(3) では MPPC 特有の処理全体を表しているが、他の処理と比べても十分短い処理時間であると言える。MPPC の各処理については次節で詳しく述べる。(4) の時間も平均では 0.7[s] となっているが、データを見るとばらつきがあった。これは今回の実験で TCP を用いたため、TCP の再送制御に依存してしまったことが原因と考えられる。この課題への対策としては、CU ネゴシエーション中に送信され

表 6.2 ハンドオーバー時における各処理時間

処理内容	処理時間 [単位]
(1) L2 ハンドオーバー	1.931[s]
(2) アドレス生成	0.276[s]
(3) CU ネゴシエーション (L3 ハンドオーバー)	96.5[ms]
(4) 通信再開	0.708[s]
合計	3.004[s]

たパケットを MPPC の CIT 内部にバッファしておくことで解決できる。ネゴシエーション完了直後にバッファしたパケットを開放することで短時間での通信再開が可能となる。

また、MIPv6 の通信断絶時間は 4[s]~5[s] ほどかかると報告されている。MIPv6 の RA の受信をトリガとした移動検知の手法からすると、断絶時間がこれ以上長くなることも十分考えられる。実験環境は有線通信ではあるが、現段階では MPPCv6 のほうが通信断絶時間が短い。この結果の違いは移動検知機能と EDAD の実装に起因していると考えられる。

6.2 DAD 処理時間

表 6.3 に MPPC ネゴシエーション中に発生する DAD 処理時間について示す。4.2 で述べた EDAD を実装したものと未実装のものを全体の合計で比べると約 2[s] ほど短縮されているのがわかる。MPPC の処理自体が非常に短いため、ほとんどの処理時間を DAD が占めていた。DAD 処理の時間はおよそ 1 秒間であるが、アドレスの状態が「Valid」に変化してから受信した NS にだけ応答する。そのため、NS の受信タイミングの差で平均で 1.5[s] ほどの時間がかかってしまう。CU Request を送信した後、ルータが送信する NS を受信するまで多少時間がかかっている。CN で CU Request を受信してから CU Response を送信するまでは 2[ms] ほどの時間なので、ルータが DAD 処理を行っているためだと推測される。結果から EDAD を用いることで、DAD 処理による遅延時間を短縮可能なことが確認できた。

表 6.3 MPPC ネゴシエーションと DAD 処理時間の詳細

処理内容	EDAD	未実装
CU Request 送信~NS 受信	95.21[ms]	91.55[ms]
NS 受信~NA 送信	0.303[ms]	1.906[s]
NA 送信~CU Response 受信	0.443[ms]	0.756[ms]
合計 (CU Request 送信~CU Response 受信)	95.79[ms]	2.005[s]

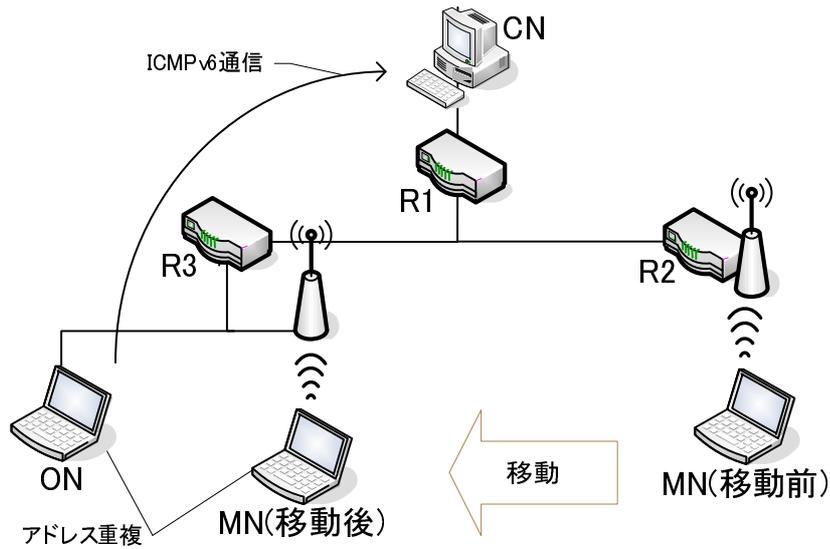


図 6.2 アドレス重複を想定した実験環境.

また、EDAD を用いた場合において、アドレス重複した端末の通信に影響を与えるかどうかについての実験を行った。図 6.2 に実験環境を示す。EDAD により通信が断絶しまうかどうかを確認するため、ON と CN には予め ICMPv6 通信をさせておく。ON のアドレスは MN が移動後に取得するアドレスを割り当てておくことで、アドレスが重複する環境にする。MN は R2 配下で通信を開始して、その後に ON と同一のネットワークに移動させた。以上のような実験環境で MN のハンドオーバーを行ったところ、EDAD を用いても ON の通信に影響を与えることなく重複アドレスを検出できた。これまでの結果から、MPPCv6 において EDAD が有効だと確認ができた。

第7章 まとめ

本稿では IPv4 で有効性が示されていた MPPC を IPv6 に対応させた MPPCv6 の実装について報告した。IPv6 における移動透過性の課題となる移動検知や DAD 処理に独自機能を実装することにより対応した。移動検知においてはインターフェースやルーティングテーブルの監視を行うことにより、迅速な移動検知が可能となった。DAD 処理については MPPC の特徴を生かして NA の O フラグを制御することにより処理時間が短縮された。

ネットワーク環境は IPv6 の普及に伴い、IPv4 と IPv6 ネットワークが混在すると考えられる。今後はそのような IPv4/IPv6 混在ネットワーク環境でも対応可能な Mobile PPC の検討と実装を行っていききたい。

謝辞

本研究にあたり，多大なる御指導と御教授を賜りました，渡邊 晃 教授には心から感謝いたします。

本論文を作成するにあたり，快く査読を引き受けて下さり，熱心にご指摘を頂きました，高橋 友一 教授に感謝の意を表します。

本論文を作成するにあたり，快く査読を引き受けて下さり，熱心にご指摘を頂きました，宇佐見 庄五 准教授に感謝の意を表します。

また，本研究を進めるにあたり，常日頃からの御意見ならびに御助言を受け賜りました，日本学術振興会特別研究員 鈴木 秀和 氏に深謝いたします。

最後に，本研究を進めるにあたり，数々の有益な御助言や御討論を賜りました，渡邊研究室の諸氏に感謝します。

参考文献

- [1] 寺岡文男：インターネットにおけるノード移動透過性プロトコル，電子情報通信学会論文誌 (D-I)， Vol. J87-D1, No. 3, pp. 308–328.
- [2] 竹内元規，鈴木秀和，渡邊晃：エンドエンドで移動透過性を実現する Mobile PPC の提案と実装，情報処理学会論文誌， Vol. 47, No. 12, pp. 3244–3257 (2006).
- [3] Johnson, D., Perkins, C. and Arkko, J.: Mobility Support in IPv6, RFC 3775, IETF (2004).
- [4] Perkins, C.: IP Mobility Support for IPv4, RFC 3220, IETF (2002).
- [5] Ishiyama, M., Kunishi, M., Uehara, K. and Teraoka, F.: LINA: A New Approach to Mobility Support in Wide Area Networks, *IEICE TRANSACTIONS on Communications*, No. 8, pp. 2076–2086 (2001).
- [6] 相原玲二，藤田貴大，前田香織，野村嘉洋：アドレス変換方式による移動透過インターネットアーキテクチャ(特集:次世代移動通信ネットワークとその応用)，情報処理学会論文誌， Vol. 47, No. 12, pp. 3889–3897 (2002).
- [7] Choi, J. and Choi, J.: Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6), RFC 4135, IETF (2005).
- [8] 金本綾子，鈴木秀和，伊藤将志，渡邊晃：IPv4 移動体通信システムにおけるパケットロスハンドオーバーの提案，情報処理学会論文誌， Vol. 50, No. 1, pp. 1–11 (2009).
- [9] Kent, S.: Security Architecture for the Internet Protocol, RFC 4301, IETF (2005).
- [10] Thomson, S. and Narten, T.: IPv6 Stateless Address Autoconfiguration, RFC 2462, IETF (1998).
- [11] Moore, N.: Optimistic Duplicate Address Detection (DAD) for IPv6, RFC 4429, IETF (2006).
- [12] Vixie, P., Thomson, S., Rekhter, Y. and Bound, J.: Dynamic Updates in the Domain Name System (DNS UPDATE), RFC 2136, IETF (1997).
- [13] 瀬下正樹，渡邊晃：Mobile PPC における認証方式の実装，DICO2006 シンポジウム論文集， Vol. 2006, No. 6, pp. 809–812 (2006).
- [14] Mishra, A., Shin, M. and Arbaugh, W.: An Empirical Analysis of the IEEE 802.11 MAC Layer Handoff Process, *ACM SIGCOMM Comput Commun Rev*, Vol. 33, No. 2, pp. 93–102 (2003).

研究業績

学術論文

なし

研究会・大会等

1. 寺澤圭史, 鈴木秀和, 渡邊晃, “IPv6 における Mobile PPC の実現と評価” 情報処理学会研究報告, 2009-MBL-52, Vol.2010, No.1, pp.1234-1239, Jan.2010.
2. 寺澤圭史, 鈴木秀和, 渡邊晃, “IPv4/IPv6 混在環境で移動透過性を可能にする Mobile PPC の実現” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2009) シンポジウム論文集, Vol.2009, No.1, Jul.2009.
3. 寺澤圭史, 鈴木秀和, 渡邊晃, “IPv4/IPv6 混在環境で移動透過性を可能にする Mobile PPC の実現” 情報処理学会研究報告, 2009-MBL-49, Vol.2009, No.17, pp.1234-1239, Apr.2009.
4. 寺澤圭史, 鈴木秀和, 渡邊晃, “IPv4/IPv6 混在環境で移動透過性を実現する Mobile PPC の検討” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム論文集, Vol.2008, No.1, pp.1593-1599, Jul.2008.
5. 寺澤圭史, 鈴木秀和, 渡邊晃, “IPv4/IPv6 混在環境における Mobile PPC の検討,” 情報処理学会第 70 回全国大会講演論文集, Mar.2008.
6. 寺澤圭史, 鈴木秀和, 渡邊晃, “IPv4/IPv6 混在環境における Mobile PPC の検討,” 平成 19 年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, Sep.2007.

付録A IPv6の用語と解説

- 1 RS (Router Solicitation)
- 2 RA (Router Advertisement)
- 3 NS (Neighbor Solicitation)
- 4 NA (Neighbor Advertisement)

A.1 Router Advertisement

プレフィックスの情報を持たないインターフェイスのためにネットワークプレフィックスとデフォルトルートに関する情報を与えるためにこのパケットを送信する。このパケットを受けとった端末は、自分自身のMACアドレスとネットワークプレフィックスからIPv6アドレスを生成する。

A.2 Router Solicitation

端末がルータから広告されるRAを要求するために送信するパケット。このパケットを受け取ったルータは、ネットワークプレフィックスやデフォルトルートの情報をRAに載せて、配下端末にマルチキャストする。

A.3 Neighbor Solicitation

このパケットは同じルータ配下の近隣端末のMACアドレスを要求するパケットです。宛先はリンクローカル内にマルチキャストで広告される。また、DAD (Duplication Address Detection) にも使用される。

A.4 Neighbor Advertisement

端末またはルータがNS (Neighbor Solicitation) パケットを受信すると、ユニキャストで応答するパケット。NSパケット内に自分自身のIPv6アドレスが記載されていたら、自分自身のMACアドレスを載せて応答する。また、DAD (Duplication Address Detection) にも使用される。