

Network-based Local Mobility Management に基づく 移動ネットワークプロトコルの実装と評価

有田 哲也^{†2} 寺岡 文男^{†1}

ノードの集合であるネットワークがインターネット内を移動するネットワークモビリティが注目を集めている。我々は、ネットワークモビリティを使用した大容量通信可能な列車インターネットの研究の過程で、ハンドオーバー直後の無線リンクの品質がハンドオーバー時間に大きな影響を与えることが分かった。この課題を解決するために、本稿は Network-based Local Mobility Management に基づいた移動ネットワークプロトコルを提案・実装した。本提案手法の基本性能を測定し、既存モビリティプロトコルと比較することで、本提案手法は許容できる処理時間でネットワークに移動透過性を提供することが可能であることが分かった。また、無線リンクの品質に関わらず安定したハンドオーバーが可能であることも示すことができた。

An Implementation and evaluation of Network Mobility Protocol based on Network-based Mobility Management

TETSUYA ARITA^{†4} and FUMIO TERAOKA^{†3}

In recent years, Network Mobility becomes one of popular topics of research, which a network consisted of some nodes moves in the Internet. We develop Broadband Communication system for the High-speed Train with Network Mobility Support Protocol. immediately after handover, the infrared link has a bad case. So signaling messages in NEMO BS occurred loss. it badly affect handovers. We propose and implement a new Network Mobility Protocol, which is based on Network-based Local Mobility Management. We evaluate a basic performance of our proposal, and we compare our proposal with existing mobility protocols. As a result, our proposal has no problem to provide mobility to mobile networks. And our proposal can execute stable handover even if the wireless link is a bad state.

1. はじめに

近年、列車や航空機などの乗客にインターネットの接続サービスを提供することができる Network mobility に関する注目が高まっている。我々は赤外線通信装置を用いた大容量通信可能な列車インターネットに関する研究を行っており、リンク層情報を利用した高速ハンドオーバー方式を提案している¹⁾²⁾ この研究では、モビリティサポートプロトコルに Network Mobility Basic Support Protocol³⁾ (NEMO BS) を利用し、列車内の乗客へ IPv6 インターネット接続を提供する。高速ハンドオーバー方式を適用した NEMO BS を NEMO fast handover method (NEMO fhm) と呼ぶ。この研究の有用性を実証するために、2010年1~2月に JR 西日本管内の東海道線において 130 km/h で走行する列車を用いた通信実験を行った。実験の結果、ハンドオーバー直後に赤外線リンクの状態が不安定になり、NEMO fhm のシグナリングメッセージが損失する可能性があることがわかった。その結果、シグナリングメッセージの再送が行われ、秒単位のハンドオーバー遅延が発生する結果となった。また、NEMO fhm はデータ配送時の冗長経路の問題や移動ネットワークが階層化した際のトンネリングによるヘッダオーバーヘッドの問題を持つ。

Internet Engineering Task Force (IETF) では Proxy Mobile IPv6⁴⁾ (PMIPv6) を標準化している。PMIPv6 は Network-based Local Mobility Management に基づくモビリティプロトコルであり、PMIPv6 ドメインと呼ばれるアクセスネットワーク内の移動透過性を保証する。PMIPv6 のシグナリングメッセージは有線側ネットワークで交換されるため、無線リンク状態に関わらず安定したハンドオーバーが可能である。また最適経路で通信が可能であるという特徴を持つ。しかし、PMIPv6 は移動ネットワークには対応していない。

そこで、本論文では有線ネットワーク側でシグナリングを実行することができる Network-based Local Mobility Management に基づいた移動ネットワークプロトコルである Proxy Network Mobility Protocol (PNEMO) を提案・実装する。また PNEMO の基本性能を測定し、既存モビリティプロトコルである NEMO BS・NEMO fhm・PMIPv6 と比較する。

^{†1} 慶應義塾大学理工学部

^{†2} 慶應義塾大学大学院理工学研究科

^{†3} Keio University

^{†4} Graduate School of Keio University

2. 関連研究

本章では、PNEMO と同様の Network-based Local Mobility Management に基づく移動ネットワークプロトコルである NEMO-enabled PMIPv6⁽⁵⁾ (NPMIPv6) と Network Mobility Support in PMIPv6 Network⁽⁶⁾ (N-NEMO) を説明し、PNEMO を設計する上で解決すべき問題を明らかにする。

2.1 NEMO-enabled PMIPv6 (NPMIPv6)

現在までに PMIPv6 を NEMO に拡張する、または PMIPv6 を NEMO BS と同時に使用する方式は提案されている⁽⁷⁾。しかし、Mobile Node (MN) が Mobile Router (MR) と Mobile Access Gateway (MAG) 間を移動した場合の移動透過性の提供などが問題となってきた。

NPMIPv6 は移動ネットワークをサポートできるように PMIPv6 を拡張したプロトコルである。図 1 は NPMIPv6 の概要を表している。NPMIPv6 を構成するエンティティは、Local Mobility Anchor (LMA)、fixed MAG (MAG)、moving MAG (mMAG)、Mobile Network Node (MNN) である。mMAG は PMIPv6 ドメインを拡張するノードであり、mMAG に接続する MNN のデフォルトゲートウェイとなる。mMAG が MNN の代わりに LMA とシグナリングメッセージを交換する。LMA と mMAG の間に双方向トンネルを確立することによって、MNN へ移動透過性を提供している。

NPMIPv6 における MNN へのパケット配送は次のように行われる。パケットを受信した LMA は MNN へパケットを配送するために Binding Cache (BC) を lookup する。LMA はパケットの終極アドレスのプレフィックスから MNN の Binding Cache Entry (BCE) を取得する。取得した BCE から mMAG のアドレスと M フラグを取得し、受信したパケットを mMAG のアドレスを終極アドレスとした IPv6 ヘッダでカプセル化する。M フラグが設定されている場合は mMAG のアドレスを検索キーとして再度 BC を lookup する。mMAG の BCE から fixed MAG のアドレスを取得する。LMA はカプセル化したパケットを fixed MAG のアドレスを終極アドレスとして IPv6 ヘッダで再度カプセル化し、パケットを送信する。fixed MAG は LMA が送信したパケットを受信するとカプセル化の IPv6 ヘッダを取り除く。その後パケットを配送する。mMAG は fixed MAG が送信したパケットを受信するとカプセル化の IPv6 ヘッダを取り除く。その後、mMAG に接続している MNN へパケットを配送する。

NPMIPv6 は上記のように移動ネットワークへ移動透過性を提供する。しかし、移動ネッ

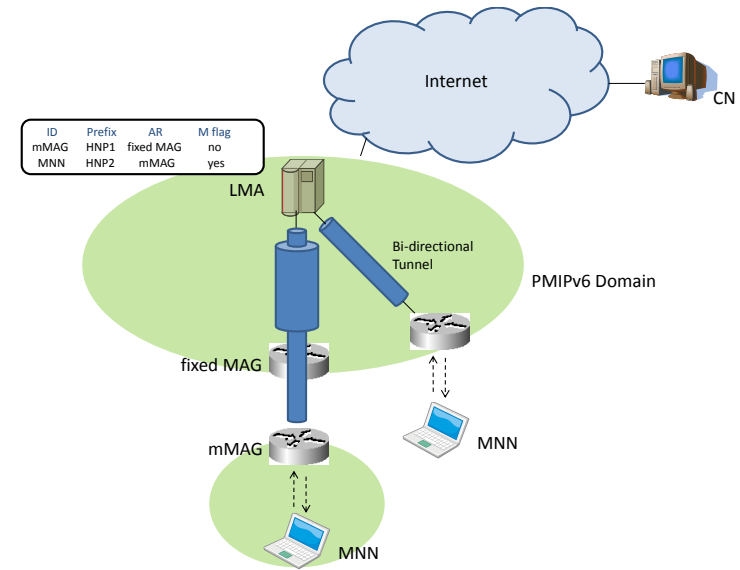


図 1 NPMIPv6 の概要

トワークが階層化する場合、再帰的なトンネリングによってヘッダオーバーヘッドが増大するという問題を抱える。

2.2 Network Mobility Support in PMIPv6 Network (N-NEMO)

N-NEMO は NPMIPv6 を改良したプロトコルであり、トンネリングによるヘッダオーバーヘッドを抑制するアーキテクチャとなっている。図 2 は N-NEMO の概要を表している。N-NEMO を構成するエンティティは、LMA、MAG、MR、MNN である。MNN には 2 つのタイプが存在する。Local Fixed Node (LFN) は移動ネットワークに接続するノードであり、移動ネットワークから移動しないノードである。また、Visited Mobile Node (VMN) は移動ネットワークに接続するノードであり、自由に MR と MAG の間を移動することができるノードである。

N-NEMO では Tunnel Splitting Model を採用しており、トンネリングによるヘッダオーバーヘッドを抑制している。図 2 に示すように、N-NEMO では MNN に移動透過性を提供する。N-NEMO は MAG と MR の間で双方向トンネルを確立し、LMA-MAG 間と MAG-MR 間でトンネルを分離するアーキテクチャとなっている。N-NEMO において、MR に MNN

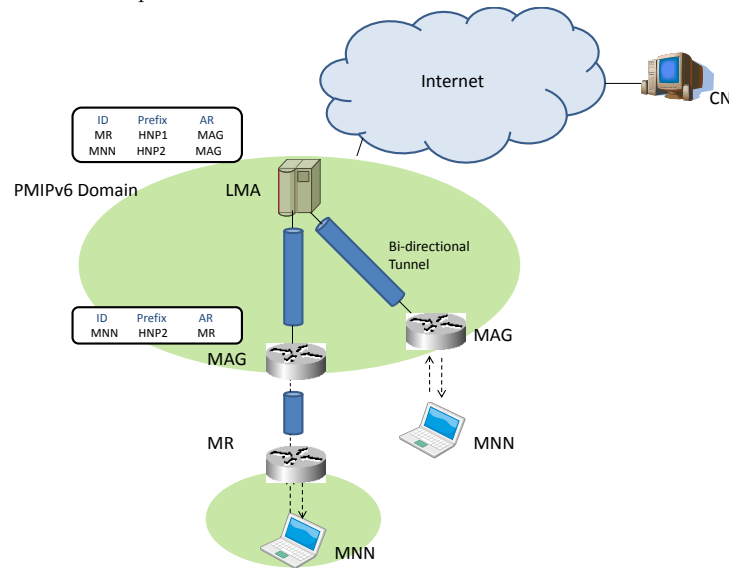


図 2 N-NEMO の概要

が接続する場合の登録手順について説明する。MR は MNN の接続を検知すると MAG へ Localized Proxy Binding Update (LPBU) と呼ばれるメッセージを送信する。MAG は LPBU を受信し、自身の Binding Update List (BUL) を検索する。もし MNN に関する Binding Update List Entry (BULE) が存在しなければ、MAG は LMA に Proxy Binding Update (PBU) を送信し、MNN を LMA に登録する。LMA は MNN の BCE を作成すると Proxy Binding Acknowledgement (PBA) を MAG に送信し、MAG との間に双方向トンネルを確立する。MAG は PBA を受信すると、MNN の BULE を作成し、Localized Proxy Binding Acknowledgement (LPBA) を MR に送信する。このとき、MAG は MR との間に双方向トンネルを確立する。

N-NEMO における MNN へのパケット配送は次のように行われる。パケットを受信した LMA は MNN へパケットを配送するために Binding Cache (BC) を lookup する。LMA はパケットの終点アドレスのプレフィックスから MNN の Binding Cache Entry (BCE) を取得する。MNN の BCE から取得した MAG を終点アドレスとした IPv6 ヘッダで受信パケットをカプセル化する。MAG は LMA が送信したパケットを受信するとカプセル化の

IPv6 ヘッダを取り除く。そして受信したパケットの送信アドレスのプレフィックスをキーとして BUL を検索し、MNN の BULE を取得する。MNN の BULE から取得した MR を終点アドレスとした IPv6 ヘッダでパケットをカプセル化し、送信する。MR は MAG が送信したパケットを受信するとカプセル化の IPv6 ヘッダを取り除き、そのパケットを MNN へ配送する。

N-NEMO は上記のように移動ネットワークへ移動透過性を提供することが可能となった。しかし、移動ネットワークが階層化する場合、再帰的なトンネリングによってヘッダオーバーヘッドが増大するという問題を抱える。

2.3 まとめ

関連研究では共通してトンネリングによるヘッダオーバーヘッドの問題を抱えていることが分かる。NPMIPv6, N-NEMO はトンネリング区間に無線区間が含まれているため、低帯域である無線区間の帯域を効率的に使用する妨げとなる。また NPMIPv6, N-NEMO とネットワークが階層化するとトンネリングが多重化しヘッダオーバーヘッドが著しく増加するという問題がある。本研究ではトンネリングによるヘッダオーバーヘッドを抑制するプロトコルとして PNEMO を設計する。

3. Proxy Network Mobility Protocol

本章では、Network-based Local Mobility Management に基づく移動ネットワークプロトコルである Proxy Network Mobility Protocol (PNEMO) を提案する。

3.1 概要

図 3 は PNEMO の概要を示している。PNEMO は NPMIPv6 や N-NEMO と同じように Network-based Local Mobility Management Protocol に基づく移動ネットワークプロトコルである。PNEMO は Packet Forwarding Model を採用しているため、LMA と MAG の間以外で双方向トンネルを確立しない設計となっている。そのため、関連研究のトンネリングによるヘッダオーバーヘッドの問題を解決している。

PNEMO を構成するエンティティは LMA, MAG, MR, MNN である。MNN には VMN, LFN の 2 つのタイプが存在する。PNEMO ではネットワークの移動をサポートするために MNN が接続する MR の情報を BC, BUL に保持できるように LMA, MAG を拡張する。

LMA は MR・VMN に Home Network Prefix(HNP)・Mobile Network Prefix (MNP) を割り当てる。また MR・MNN の Identifier (MN-ID) をキーとした BCE を作成し、移動ノードやトンネルを管理する。PNEMO では VMN が接続している MR に関する情報を保

持できるように BC を拡張する .

PMIPv6 と同様に MAG は MR・VMN の移動を検知する機能を持つと仮定する . また MR・VMN の代わりに PBU を LMA に送信し , HNP・MNP の割り当てを要求する . MAG は PBA を受信すると BULE を作成し , LMA との間で双方向トンネルを確立する . さらにパケット配送のために MR・VMN の経路設定を行う .

移動ネットワークが階層化した場合 , 下位の移動ネットワークの MR を subMR と呼ぶ . MR は subMR・VMN のデフォルトルータであり , 接続する subMR・VMN の代わりにシグナリングメッセージを MAG と交換する . subMR は階層化ネットワークのデフォルトルータである . MR が MAG と交換するシグナリングメッセージは Nested Binding Update (NBU)・Nested Binding Acknowledgement (NBA) と呼ばれ , subMR・VMN の情報を PMIPv6 ドメインに通知する役割を持つ . MR は NEMO State Table (NST) と呼ばれるテーブルに接続する VMN , subMR の情報を保持する . また LFN に対しては LMA から割り当てた MNP を広告する役割を持つ . MR は MAG や他の subMR と同じリンクローカルアドレスを使用する . これによって , subMR・VMN は MAG と MR の間を自由に移動することが可能となる .

PNEMO では NBU・NBA を用いて MR - MAG 間で移動ネットワークの情報を交換することができる . これによって MAG・MR は移動ネットワーク内のノードへの経路を設定することが可能となり , パケット配送のためのトンネリングは必要ない .

3.2 登録処理

PNEMO において MNN が通信可能となるためには , MNN が初めて PMIPv6 ドメインに接続したときに LMA にシグナリングメッセージを交換し , MNN を登録する必要がある . この登録処理について説明する .

PNEMO では以下の登録処理が発生すると想定される .

- Registration1** VMN が MAG に接続する
- Registration2** VMN が MR に接続する
- Registration3** VMN が subMR に接続する
- Registration4** MR が MAG に接続する
- Registration5** MR が MR に接続する
- Registration6** MR が subMR に接続する

Registration4~6 は Registration1~3 と基本的には同じ登録処理になるため , Registration1~4 のみ説明する . 図 4 に登録処理時のメッセージシーケンスを示す .

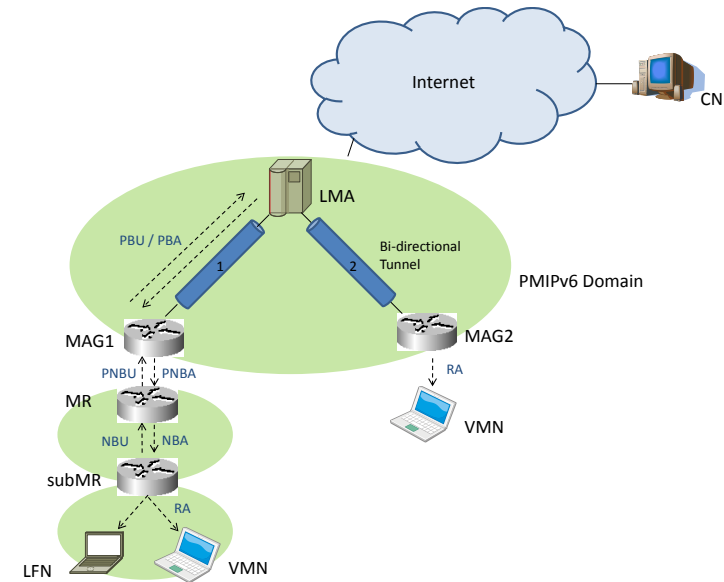


図 3 PNEMO の概要

3.2.1 登録処理: Registration1

図 4 中 (1)~(3) は VMN が MAG に接続する場合の登録処理のメッセージシーケンスを示している . メッセージシーケンスは PMIPv6 と同じとなる .

- (1) MAG は VMN の接続を検知すると MN-ID を取得し , MN-ID を含んだ PBU を LMA に送信する .
- (2) LMA は PBU を受信すると BCE を生成する . また HNP を割り当て , 双方向トンネルを確立する . その後 , MAG に PBA を送信する .
- (3) MAG は PBA を受信すると , VMN に HNP を広告するため Router Advertisement (RA) を送信する .

3.2.2 登録処理: Registration2

図 4 中 (4)~(8) は VMN が MR に接続する場合の登録処理のメッセージシーケンスを示している . MR は接続した VMN の情報を PMIPv6 ドメインに通知するため , 新たに定義した NBU・NBA を交換する .

- (4) MR は VMN の接続を検知すると MN-ID を取得する . MR は自身の MN-ID を Up-

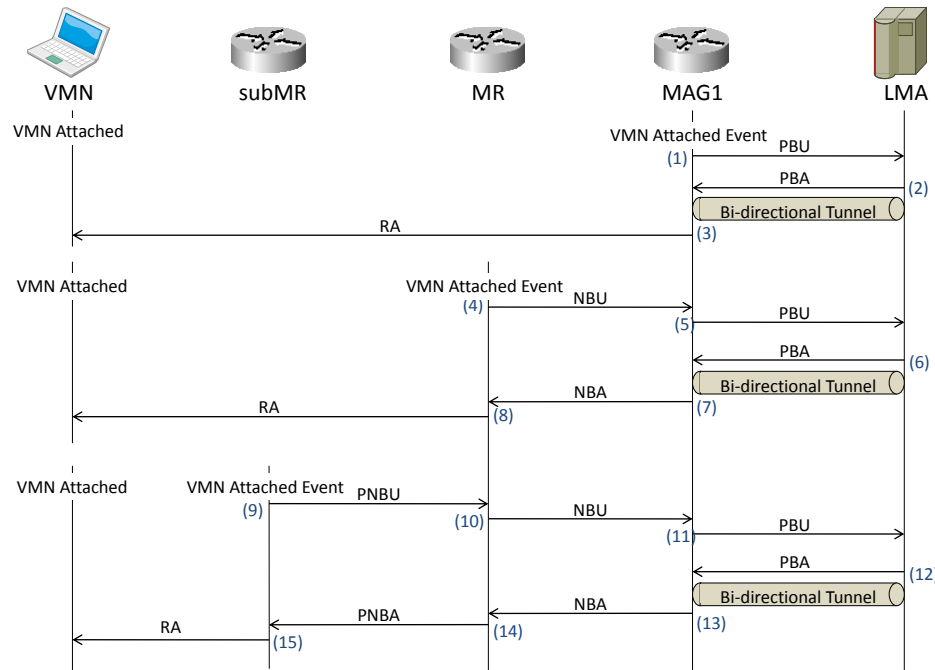


図 4 登録処理時のメッセージシーケンス

per Router Identifier option に格納する。さらに VMN の MN-ID を格納した NBU を MAG に送信する。

- (5) MAG は NBU を受信すると、VMN の BULE を生成する。このとき BULE の Upper Router Identifier field に MR の MN-ID を登録する。その後、PBU を LMA に送信する。
- (6) LMA は PBU を受信すると VMN の BCE を生成する。VMN の BCE の Upper Router Identifier field には MR の MN-ID を格納する。LMA は HNP を割り当て、双方向トンネルを確立する。その後、MAG に PBA を送信する。
- (7) MAG は PBA を受信すると VMN への経路を MR に設定する。その後、MR に NBA を送信する。

- (8) MR は NBA を受信すると NST に VMN を登録する。HNP を VMN に広告するため RA を送信する。

3.2.3 登録処理: Registration3

図 4 中 (9) ~ (15) は VMN が subMR に接続する場合の登録処理のメッセージシーケンスを示している。MR は NBU を受信すると、その情報をより上流の MR もしくは MAG に通知するために、NBU の P フラグをセットした Proxy Nested Binding Update (PNBU) を送信する。

- (9) subMR は VMN の接続を検知すると MN-ID を取得し、subMR 自身の MN-ID と VMN の MN-ID を含む NBU を MR に送信する。
- (10) MR は NBU を受信すると VMN を NST に登録する。MR 自身の MN-ID、subMR の MN-ID、VMN の MN-ID を含む PNBU を MAG に送信する。
- (11) MAG は PNBU を受信すると、VMN の BULE を生成する。このとき BULE の Upper Router Identifier field に MR と subMR の MN-ID を登録する。その後、PBU を LMA に送信する。
- (12) LMA は PBU を受信すると VMN の BCE を生成する。VMN の BCE の Upper Router Identifier field には MR と subMR の MN-ID を格納する。LMA は HNP を割り当て、双方向トンネルを確立する。その後、MAG に PBA を送信する。
- (13) MAG は PBA を受信すると VMN への経路を MR に設定する。その後、MR に Proxy Nested Binding Acknowledgement (PNBA) を送信する。
- (14) MR は PNBA を受信すると VMN への経路を subMR に設定する。その後、subMR に NBA を送信する。
- (15) subMR は NBU を受信すると NST に VMN を登録する。その後、HNP を VMN に広告するため RA を送信する。

3.2.4 登録処理: Registration4

図 4 中 (1) ~ (3) は VMN が MAG に接続する場合の登録処理のメッセージシーケンスを示しているが、MR が接続した場合も基本的な処理は同じとなる。VMN が接続した場合との違いは LMA で HNP だけでなく MNP も割り当てられることである。

3.3 ハンドオーバー処理

PNEMO におけるハンドオーバー処理について説明する。

以下のハンドオーバー処理について説明する

Handover1 VMN のハンドオーバー

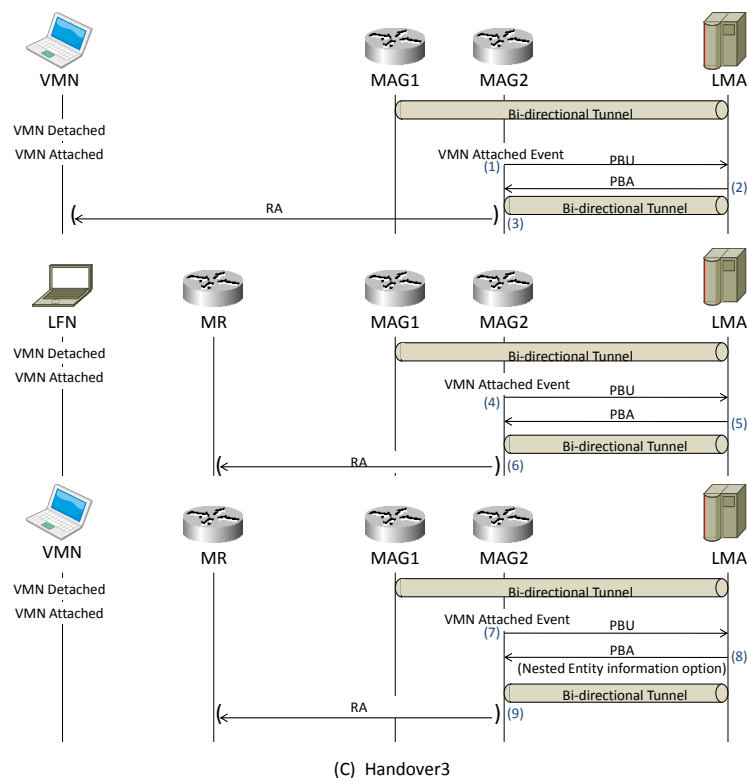


図 5 ハンドオーバー時のメッセージシーケンス

Handover2 MR と LFN が構成するネットワークのハンドオーバー

Handover3 MR と VMN が構成するネットワークのハンドオーバー

図 5 は PNEMO のハンドオーバー時のメッセージシーケンスを表している。また VMN, MR の IP アドレスはハンドオーバー前後で変化しないため、図中 (3) (6) (9) で広告する RA は損失してもハンドオーバーに影響はない。ハンドオーバー時のシグナリングメッセージはすべて MAG と LMA 間の有線ネットワーク上で交換されるため、ハンドオーバー後のリンク状態が不安定であっても安定したハンドオーバー処理が期待できる。

3.3.1 ハンドオーバー処理: Handover1

VMN 単独のハンドオーバー処理は PMIPv6 と同じ処理となる。また図では MAG 間を移動しているが、MR - MAG 間、MR-MR 間のハンドオーバー処理の場合も登録処理と同様の手順となる。

3.3.2 ハンドオーバー処理: Handover2

MR と LFN が構成するネットワークのハンドオーバー処理は PMIPv6 のハンドオーバーと基本的には同じとなる。しかし、(5) で LMA は LFN に広告している MNP を再度割り当てる必要がある。また (6) においても MAG は RA に HNP・MNP の両方を格納して RA を送信する。

3.3.3 ハンドオーバー処理: Handover3

MR と VMN が構成するネットワークのハンドオーバー処理において、(8) で LMA は MR の MN-ID を持つ PBU を受信する。LMA は MR の BCE を更新した後、MR の MN-ID をキーとして BC の Upper Router Identifier field を検索する。その結果、Upper Router Identifier field に MR の MN-ID を持つ VMN の BCE が発見される。LMA はこの VMN の情報を Nested Entity Information option に格納した PBA を MAG に送信する。(9) で MAG は PBA を受信すると、Nested Entity Information option から VMN の BULE を生成し、MR に経路を設定する。これによって、MR と VMN ので構成されたネットワークのハンドオーバー処理が完了する。

4. 実 装

PNEMO は本研究室が開発した PMIPv6⁸⁾ をベースに実装した。PMIPv6 を実現するユーザデーモンプログラムである mip6d を拡張し、Linux2.6.29.5 上に PNEMO を実装した。図 6 に PNEMO のモジュールを示す。

5. 評 価

5.1 基本性能

PNEMO における登録処理・ハンドオーバー処理に時間を測定した。測定は各処理を 10 回測定し、平均値を測定値とした。図 1 に登録処理時間、図 2 にハンドオーバー処理時間を示す。ハンドオーバー処理時間は MAG が MR・VMN に移動を検知してから、RA を送信するまでの時間とする。Registration3 は NBU・NBA, PNBU・PNBA の交換が発生するため、登録処理時間も長くなっている。これより、ネットワークの階層化が深くなるにつれて登録

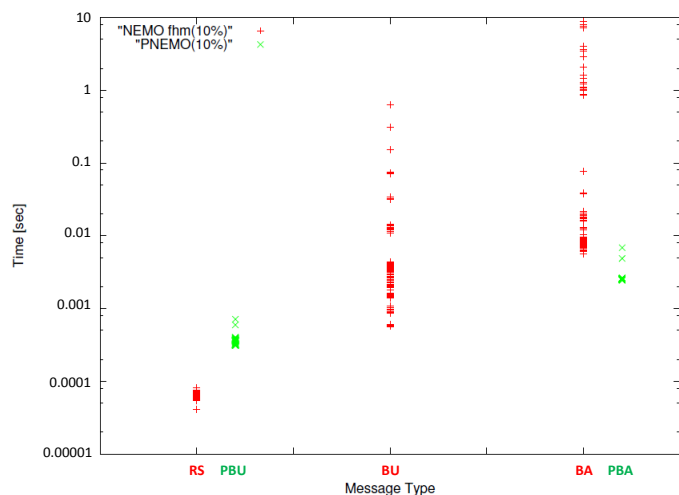


図7 ハンドオーバーの安定性の比較 (フレームエラー率 10%)

NEMO fhmにおいてRS・RA・BU・BAは無線区間を通るため、ハンドオーバー直後の無線状態によってはこれらのメッセージが損失する可能性がある。フレームエラー率10%においても、ハンドオーバー完了までに秒単位の時間を要することが分かる。

一方PNEMOは有線区間でのみシグナリングメッセージを交換するので、フレームエラー率に関係なく一定の時間でハンドオーバーすることが可能であることが分かる。

6. おわりに

本研究ではNetwork-based Local Mobility Managementに基づく移動ネットワークプロトコルであるProxy Network Mobility Protocol (PNEMO)を提案した。PNEMOはLMA-MAG間でのみトンネルを確立するプロトコルであるため、関連研究と比較してトンネリングによるヘッダオーバーヘッドを抑制することが可能となる。また有線側でシグナリングメッセージを交換するため、安定したハンドオーバーが可能となる。PNEMOをLinux 2.6.29.5上に実装し、基本性能を測定した。また既存のモビリティプロトコルであるNEMO BS・NEMO fhm・PMIPv6と比較した。その結果、PNEMOの登録処理時間は2.5~4.2msec

程度、ハンドオーバー処理時間は2.4~2.8msec程度であり、無視できるほどの時間であることが分かった。また、無線リンクが不安定な状況においてNEMO fhmとPNEMOを比較した。NEMO fhmはパケットロスにより、秒単位のハンドオーバー遅延を発生する場合もあったが、PNEMOは安定したハンドオーバーが可能であった。

我々はPNEMOをIETFにInternet Draftとして提案しており、現在も進行中である¹⁰⁾。

参考文献

- 1) Tetsuya Arita and Fumio Teraoka. Providing a High-Speed Train with a Broad-band NEMO Environment. In *Proceedings of AINTEC 2010*, November 2010.
- 2) Shinichiro Haruyama, Hideki Urabe, Tomohiro Shogenji, Shoichi Ishikawa, Masato Hiruta, Fumio Teraoka, Tetsuya Arita, Hiroshi Matsubara, and Shingo Nakagawa. New Ground-to-Train High-Speed Free-Space Optical Communication System with Fast Handover Mechanism. In *Optical Fiber Communication Conference, 2011 and the 2011 National Fiber Optic Engineers Conference*.
- 3) V. Devarapalli, R. Wakikawa, A. Petrescu, and P. Thubert. Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol. RFC3963, *IETF*, Jan. 2005.
- 4) S.Gundavelli, K.Leung, V.Devarapalli, K.Chowdfury, and B.Patil. Proxy Mobile IPv6. RFC5213, *IETF*, Jun. 2008.
- 5) Ignacio Soto, CarlosJ. Bernardos, Maria Calderon, Albert Banchs, and Arturo Azcorra. Nemo-enabled localized mobility support for internet access in automotive scenarios. *Comm. Mag.*, Vol.47, No.5, pp. 152-159, 2009.
- 6) Zhiwei Yan, Sidong Zhang, Huachun Zhou, Hongke Zhang, and Ilsun You. Network mobility support in pmipv6 network. In *IWCMC '10: Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pp. 890-894, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- 7) CJ. Bernardos, M.Calderon, and I.Soto. PMIPv6 and Network Mobility Problem Statement. Internet-Draft draft-bernardos-netext-pmipv6-nemo-ps-01, Internet Engineering Task Force, October 2009. Informational.
- 8) Mathieu Poulain, 寺岡文男. Linux 環境へのPMIPv6の実装と評価. 信学技報, March 2009.
- 9) 神谷弘樹, 渋井理恵, 寺岡文男. IP モビリティ実験のための無線環境エミュレータの試作. 情報処理学会 マルチメディア通信と分散処理 研究報告 No.118, pp. 19-24, June 2004.
- 10) T.Arita and F.Teraoka. Proxy Network Mobility Protocol. Internet-Draft draft-arita-netext-pnemo-00, Internet Engineering Task Force, October 2010.