

Proxy Mobile IPv6 のネットワーク性能向上のための一検討

渡辺悠太^{†1} 中村嘉隆^{†2} 高橋修^{†2}

ハンドオーバー技術の一つに，移動端末の通信経路をネットワーク主体で切り替える Proxy Mobile IPv6 がある．Proxy Mobile IPv6 は Mobile IPv6 や SIP モビリティといったハンドオーバー技術とは異なり，移動端末に特別な機能を実装することが不要であるという特徴がある．しかし，ネットワークにハンドオーバーのための機能を実装するため，移動端末の全ての通信がプロキシサーバを経由するという問題がある．そこで本稿では，Proxy Mobile IPv6 の問題をネットワーク性能の低下原因であると仮定するし，Software Defined Network を前提としたネットワークを構築するために OpenFlow を用いることで，位置管理サーバを経由しない通信を検討し提案する．

An improvement method for network performance of Proxy Mobile IPv6

YUTA WATANABE^{†1} YOSHITAKA NAKAMURA^{†2} OSAMU TAKAHASHI^{†2}

1. はじめに

ノートパソコンやスマートフォン，タブレット型端末等の移動端末の普及により，これらを所持する人口が増加している．中でも近年のスマートフォン普及率の増加は著しく，2015 年には販売台数においてスマートフォンが携帯電話を上回ると予測されている．今後スマートフォンの普及率はさらに増加し，屋外でもインターネットを利用する環境が整備され，利用する人々が増加すると予測される．

しかし，端末が移動することで起こりうる問題がある．トランスポートプロトコルである TCP は IP アドレスとポート番号の組を用いて，通信相手と接続を確立し通信を行う．IP アドレスかポート番号のどちらかが変化してしまうと接続を維持することができず，通信が切断されてしまう．そこで移動端末が基地局間を移動しても通信を継続できるハンドオーバー技術[1]が重要となる．図 1 に一般的なハンドオーバーの様子を示す．



図 1 ハンドオーバー

移動端末は接続している基地局の通信範囲外に移動した場合，新たな基地局の探索を開始する．移動端末が新たな基地局を発見したとき，自動的にその基地局に接続を試みる．しかし，接続を切り替えるだけでは移動端末の IP アドレスの変化や通信経路の制御ができないといった問題がある．

それらの問題を解決するハンドオーバー技術に，MIPv6 (Mobile IPv6)[2]や PMIPv6 (Proxy Mobile IPv6)[3]，SIP モビリティ (Session Initiation Protocol Mobility)[4]がある．そのなかでも PMIPv6 は LMA (Local Mobility Anchor) と呼ばれる位置管理サーバと無線 LAN ルータや基地局等に整備された MAG (Mobility Anchor Gateway) 間で通信経路の制御を行うネットワーク主導型のハンドオーバーで技術ある．移動端末のハンドオーバー時には LMA-MAG 間で通信経路を切り替えるため，ハンドオーバーのための特別な機能を持たない移動端末でもハンドオーバーを実行できるといった利点がある．しかし，PMIPv6 では移動端末が LMA を経由して通信を行うため LMA 付近が性能のボトルネックとなりやすいといった問題がある．

そこで本稿では，移動端末へのミドルウェアの実装を不要とすることを前提に，PMIPv6 に OpenFlow[5][6]を適用することで，移動端末の通信経路を最適化するハンドオーバー方式の提案する．また，PMIPv6 を拡張することによりネットワーク性能の向上を目的とする．提案方式と従来方式の比較評価，実験を実施し提案方式の有用性を示す．

^{†1} 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科
Graduate School of Systems Information Science, Future University Hakodate

^{†2} 公立はこだて未来大学 システム情報科学部
Systems Information Science, Future University Hakodate

2. 基礎技術

2.1 OpenFlow

OpenFlow とはネットワークをソフトウェアによって制御するために規格化された新しい標準規格である。OpenFlow は、従来パケットを転送していたスイッチと呼ばれるネットワーク機器を、コントロールプレーンと呼ばれるパケットの経路制御機能部とデータプレーンと呼ばれるデータ転送機能部の2つの機能に分離して管理するという特徴がある。

2.1.1 OpenFlow スイッチ

OpenFlow スイッチはパケットの転送処理を行う。従来のネットワーク機器とは異なり、パケットの転送先やヘッダの書き換えといった処理を行わない。OpenFlow スイッチでは起動時に予め接続・設定された OpenFlow コントローラと制御用の通信経路を確立する。これにより OpenFlow スイッチは OpenFlow コントローラに対して転送処理の問い合わせが可能となる。

2.1.2 OpenFlow コントローラ

OpenFlow コントローラは、各 OpenFlow スイッチにパケットの転送処理等を指示する司令塔の役割である。OpenFlow スイッチからパケットの問い合わせを受けるとパケットの制御方法を計算し、フローテーブルを作成する。作成したフローテーブルを OpenFlow スイッチに送信することによって経路制御を行う。

2.1.3 基本動作

OpenFlow の動作例を図2に示す。

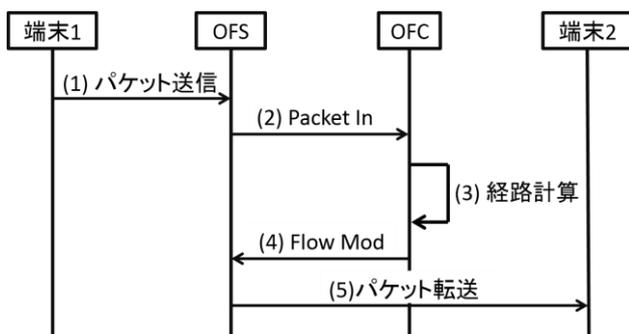


図2 OpenFlow の動作例

1. 端末1が端末2にパケットを送信する。
2. パケットを受信した OpenFlow スイッチは、自身のフローテーブルを参照し、一致しない場合は OpenFlow コントローラへ Packet In を行う。この時 OpenFlow スイッチではパケットをバッファリングしており、Packet In にバッファ ID を指定する。

3. Packet In を受信した OpenFlow コントローラは経路計算を行う。
4. 経路計算後、OpenFlow コントローラは OpenFlow スイッチに対してフローを追加するために Flow Mod を行う。OpenFlow スイッチがバッファリングしているパケットを指定するために、Flow Mod には Packet In に記述されていたバッファ ID を記述する。
5. Flow Mod を受けた OpenFlow スイッチは、追加されたフローと記述されているバッファ ID に従い、バッファリングしていたパケットを転送する。

2.2 Proxy Mobile IPv6

PMIPv6 は MN のネットワーク上での移動に関する処理をネットワーク側の機構のみでサポートするハンドオーバー技術である。PMIPv6 は LMA と MAG から構成される。LMA と MAG、そして移動端末を収容するネットワークを PMIPv6 ドメイン (Proxy Mobile IPv6 ドメイン) と呼ぶ。PMIPv6 の研究は近年盛んに行われている [7][8]。

2.2.1 Local Mobility Anchor

LMA は PMIPv6 において MN と CN との間で IP パケットを中継する機能を持つ。PMIPv6 ドメインでは MN の送受信するパケットは全て LMA に転送される。LMA は MN のネットワークプレフィックスの割り当てと管理を行う。また、MN と MAG に関する情報は BCE (Binding Cache Entry) により管理しており、BCE を参照することで移動した MN に移動前と同じネットワークプレフィックスを割り当てる。表1に PMIPv6 における BCE の例を示す。MN-ID (MN-Identifier) は PMIPv6 ドメインにおいて、各 MN に割り当てられる一意な識別子である。

表1 BCE の例 (PMIPv6)

	Entry1	Entry2
MN-ID	08:00:20:1f:53:33	08:00:20:1f:53:34
MAG Address	2001:903:11:1210::/60	2001:903:11:1210::/60
MN Prefix	2001:903:11:1111::/64	2001:903:11:1111::/64

2.2.2 Mobile Access Gateway

MAG は MN のデフォルトゲートウェイとしての機能を持つ。MAG は MN の接続と移動を検知し、MN に代わって LMA と移動に関する処理を行い、LMA に移動先の情報を通知する。

2.2.3 ハンドオーバー時の手順 (Proxy Mobile IPv6)

PMIPv6 におけるハンドオーバー時の手順を図3に示す。

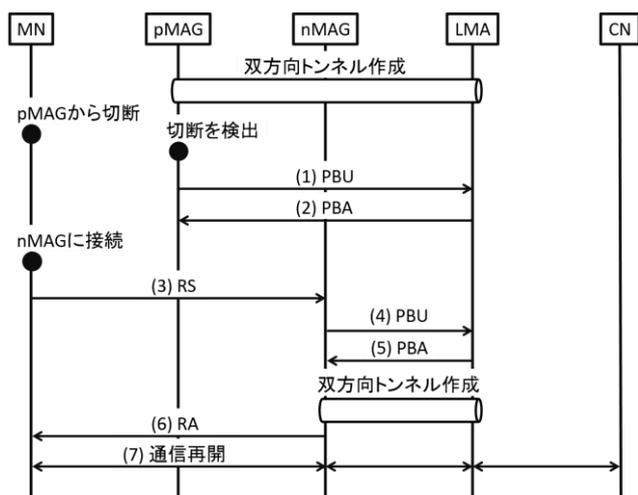


図 3 PMIPv6 におけるハンドオーバー手順

1. MN は pMAG との接続を切断する。切断を検知した pMAG は切断のための PBU を LMA に送信する。
2. LMA は pMAG とのバインディングを解除し、pMAG に PBA を送信する。pMAG が PBA を受信することで切断処理は完了となる。
3. MN は移動し nMAG に接続したとき、nMAG に RS パケットを送信する。
4. nMAG は LMA に PBU を送信し、バインディングを要求する。
5. LMA は受信した MN-ID を用いて自身のデータベースを参照し、適合する BCE が存在するならば、組となっているネットワークプレフィックスを nMAG に PBA として送信する。その後、LMA は LMA-nMAG 間の双方向トンネルを設定する。
6. nMAG は MN に RA パケットを送信し、MN へネットワークプレフィックスを割り当てる。
7. MN は自身の MAC アドレスから生成したリンクローカルアドレスと MAG から受信したネットワークプレフィックスを組み合わせることで、IPv6 アドレスを生成し通信を再開できる。これでハンドオーバーを完了とする。

2.2.4 Proxy Mobile IPv6 の問題点

PMIPv6 の問題点を 3 つ挙げる。まず通信経路が冗長になりがちなことである。PMIPv6 ドメインにおいて、MN のネットワークプレフィックスは、LMA と同じものを使用する。そのため、LMA は MN が送受信する全ての通信をインターセプトしてしまい、通信経路が冗長になる。冗長な通信経路はネットワークの通信性能を低下させる原因になってしまう。

次に LMA にかかる処理負荷が増大することである。1 つ目の問題点に挙げたように、PMIPv6 ドメインにおいて MN が送受信する全ての通信は LMA を経由する。そのため、

LMA にかかる処理負荷は他のネットワーク機器よりも増大してしまう。ネットワーク機器の過負荷状態はパケットロス等の原因になり、ネットワークの通信性能を低下させてしまう恐れがある。

最後にトンネリング処理により通信遅延が増大することである。PMIPv6 ドメインにおいて、MN の通信をインターセプトした LMA は、パケットを正規の宛先に届けるために MAG との間で双方向トンネルを作成する。このトンネリング処理はトータルパケットサイズの増加やルータによる IPv6 ヘッダのカプセル化・デカプセル化にかかる処理時間により、通信遅延が増大する可能性がある。

2.3 既存ハンドオーバー技術の問題点

既存ハンドオーバー技術の問題点をまとめたものを表 2 に示す。

表 2 既存ハンドオーバー技術の問題点

	PMIPv6	MIPv6	SIP Mobility
通信経路の冗長性	×	×	○
ミドルウェア実装の不要性	○	×	×
トンネリング処理による遅延	×	×	○
位置管理サーバの過負荷状態	×	×	○
ハンドオーバー時の切断時間	○	○	×
TCP のコネクションの維持	○	○	×

本稿では移動端末へのミドルウェアの実装を不要とすることを前提としているので、MIPv6 と SIP モビリティは条件に合致しない。PMIPv6 は移動端末へのミドルウェアの実装を不要としているが、2.2.4 項で挙げた問題がある。そこで PMIPv6 に着目しその問題点を解決する。

3. 関連研究

3.1 関連研究の概要

PRO (PMIPv6 route optimization protocol) [9][10]では、PMIPv6 ドメイン内での通信において MN の通信経路は冗長であり、ネットワーク性能を低下させる原因であることを問題として挙げている。この問題に対して、MN が接続している MAG は CN が接続している MAG に対してトンネルを作成することで、MAG 間でのダイレクトパスを作成し、MAG の同士の直接通信を実現する。これにより通信経路を最適化し、ネットワーク性能の向上を図っている。

3.2 関連研究の方式

PRO におけるハンドオーバー手順を図 4 に示す。

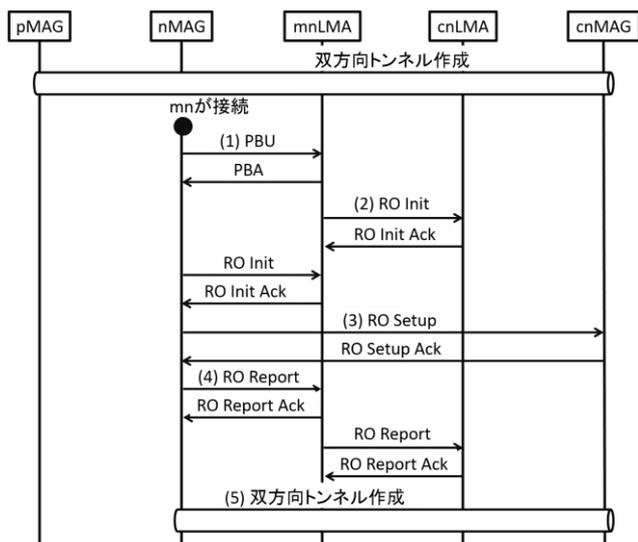


図4 PROにおけるハンドオーバー手順

1. MN が nMAG に接続したとき、nMAG は PBU を mnLMA に送信する。その後、mnLMA は nMAG に PBA を送信する。
2. mnLMA は cnLMA と RO Init/Ack メッセージを交換し、RO (Route Optimization) 適用の宣言を行う。同様にして nMAG ともメッセージを交換する。
3. nMAG は cnMAG とトンネルを作成するために RO Setup/Ack メッセージを交換する。
4. nMAG は mnLMA と RO Report/Ack メッセージを交換しトンネルの通知を行う。同様にして mnLMA は cnLMA と RO Report/Ack メッセージを交換する。
5. nMAG-cnMAG 間の双方向トンネルを設定する。これで PRO におけるハンドオーバーを完了とする。

3.3 関連研究の問題

PRO の問題点を2つ挙げる。1つ目は、CN が PMIPv6 ドメイン内に存在しなければならないことである。PRO では MN の接続している MAG と CN の接続している MAG の間にトンネルを作成する。そのため、CN が PMIPv6 ドメイン内に存在するときにはしか適用できないという問題がある。

2つ目は、トンネルを作成するためのメッセージによるオーバーヘッドが増加することである。ハンドオーバー時に複数のメッセージを交換しトンネルを作成のための設定を行うため、切断時間が長くなる恐れがある。

4. 提案方式

4.1 アプローチ

本稿ではハンドオーバー時に PMIPv6 および PRO を利用した場合に生じる問題に対して、PMIPv6 ドメインにおいて LMA を経由しない通信経路の構築を課題として設定した。この課題を解決するために OpenFlow 技術に着目し、

PMIPv6 ドメインに OpenFlow を適用することで、LMA を経由しない通信経路の構築することができる。さらに、OpenFlow にパケット転送を担当させることで LMA・MAG はカプセルング・デカプセルング処理を行う必要がなくなり、トンネリング処理による通信遅延を減少させることができる。したがって、LMA の処理負荷が軽減され、ネットワーク性能の向上が見込める。

4.2 ネットワーク構成

本提案方式におけるネットワーク構成例を図5に示す。(a) は LMA に OpenFlow コントローラの機能を持たせる場合であり、LMA は OpenFlow スイッチの機能を持たせる Router や MAG と直接接続する。(b) は新規に OpenFlow コントローラを設置する場合である。

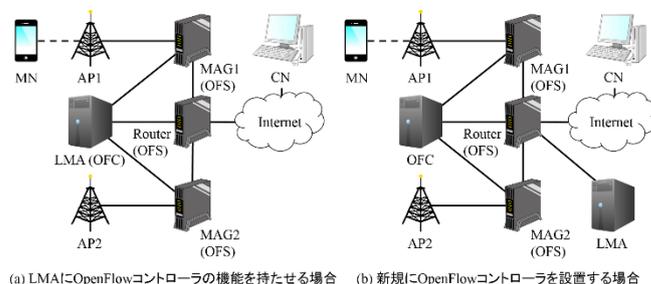


図5 ネットワーク構成例

4.3 OpenFlow の適用

PMIPv6 ドメインにおいて LMA を経由しない通信を実現するため、OpenFlow を適用する。OpenFlow を構成する要素の1つである OpenFlow コントローラは、図5(b)のように新規に設置するほかに、図5(a)のように LMA にその機能を実装する方式を想定している。OpenFlow スイッチは図5においての Router と MAG にその機能を実装する。これにより、PMIPv6 ドメインの主要機器に OpenFlow を適用することができる。

4.4 PMIPv6 の拡張

4.4.1 トンネリング処理の省略化

OpenFlow がパケットを転送する機能を担当するため、LMA-MAG間でトンネルを作成せずに正規の宛先にパケットを転送することが可能になる。そのため、PMIPv6 プロトコルを拡張し、トンネリング処理を行わないように設定する。

4.4.2 LMA の拡張

図5(a)のように LMA に OpenFlow コントローラの機能を持たせる場合、OpenFlow アクションの FlowMod を行う契機として PBU メッセージの情報を利用する。PBU メッセージの宛先アドレスは MN が接続している MAG のアド

レス、送信先アドレスは LMA のアドレスになっている。PMIPv6 では、PBU を受信した LMA は、接続した MN の BCE を自身のデータベースに保存し、PBA を送信する。このとき、LMA は MN のリンクローカルアドレスと同値である MN-ID を用いて、OpenFlow スイッチの機能を実装した Router と MAG に FlowMod を送信し、フローテーブルの更新を要求する。Router と MAG は自身のフローテーブルを表 5、表 6 のように更新する。表 3 は Router の保持しているフローテーブル、表 4 は MAG の保持しているフローテーブルをそれぞれ示す。

表 3 Router のフローテーブル

	Header Fields	Action
Entry 1	src = CN's address, dst = MN's address	Forward MAG
Entry 2	src = MN's address, dst = CN's address	Forward CN's Gateway

表 4 MAG のフローテーブル

	Header Fields	Action
Entry 1	src = CN's address, dst = MN's address	Forward MN
Entry 2	src = MN's address, dst = CN's address	Forward Router

4.5 ハンドオーバー手順

本提案方式におけるハンドオーバー手順を図 6 に示す。

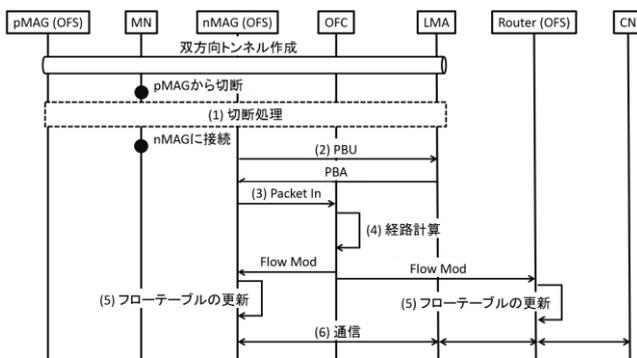


図 6 提案方式におけるハンドオーバー手順

1. 切断の手順は 2.2.3 節の PMIPv6 におけるハンドオーバー手順と同様であるため省略する。
2. MN が nMAG (OFS) に接続したとき、nMAG は PBU を LMA に送信する。その後、LMA は nMAG に PBA を送信する。
3. nMAG (OFS) は OpenFlow アクションの Packet In を行うことで OpenFlow コントローラに指示を要求する。ここで、図 5 (a) LMA に OpenFlow コントローラの機能を実装する場合には、PBU メッセージを受信したと

きに Packet In を行い、図 5 (b) 新規に OpenFlow コントローラを設置する場合には PBA を契機に Packet In を行う。

4. LMA は Packet In の情報をもとに経路計算を行う。その後、Router (OFS) と nMAG (OFS) に対してフローテーブルを更新するために Flow Mod を行う。
5. Router (OFS) と nMAG (OFS) はそれぞれ自身のフローテーブルを更新し、不要になったフローエントリをフローテーブルから削除する。
6. これにより、CN-MN 間の通信は Router (OFS) と nMAG (OFS) が自身のフローテーブルを参照し、パケットを転送することで、LMA を経由せずに行うことができる。このときトンネリング処理は必要としない。これで提案方式におけるハンドオーバーを完了とする。

5. 実験および評価

本稿では、PMIPv6 に OpenFlow を適用することで LMA を経由しない通信が実現できると述べてきた。そこで本実験では、提案方式である OpenFlow を適用した PMIPv6 と通常の PMIPv6 を比較し、提案方式の有用性を示すため実験及び評価を行う。

5.1 トンネリング処理による通信遅延の評価

5.1.1 実験構成

トンネリング処理による通信遅延を調査するため、実験を行った。本実験の構成を図 7 に示す。端末 A と端末 B の通信において、(a) トンネリング処理を用いずに通信した場合と (b) トンネリング処理を用いて通信した場合のスループットを調べる。



(a) トンネリング処理を用いずに通信した場合 (b) トンネリング処理を用いて通信した場合

図 7 トンネリング処理による通信遅延の調査実験

5.1.2 実験結果

表 5 は端末 A と端末 B 間のスループットを示している。(a) トンネリング処理を用いずに通信したほうがスループットは約 1.2 倍向上した。

表 5 端末 A と端末 B 間のスループット

実験方法	スループット [MB/s]
(a) トンネリング処理無し	1.23 [MB/s]
(b) トンネリング処理有り	1.07 [MB/s]

5.2 ネットワークスループットと LMA 負荷の評価

5.2.1 実験構成

ネットワークシミュレータである ns-2 (Network Simulator version 2)[11] を用いて実験を行った。ns-2 上に図 9 のようなネットワークを構成した。(a) は通常の PMIPv6 を用いて CN から MN までの通信を行い、(b) は提案方式を用いて CN から MN までの通信を行う。本実験では LMA の負荷軽減を明確化するため、新規に OpenFlow コントローラを設置した場合を想定した。また、(a)、(b) とともに、表 6 に示すシミュレーションパラメータを設定した。

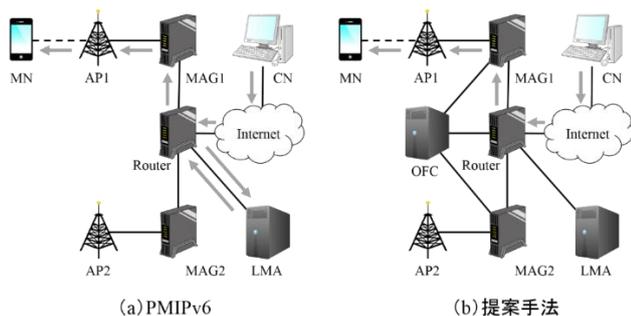


図 9 ネットワークスループットと LMA 負荷の調査実験

表 6 シミュレーションパラメータ

無線 LAN ルータの伝送速度	54Mbps
各リンクの速度	100Mbps
パケットサイズ	1040byte
通信プロトコル	TCP
トラフィック	FTP
ネットワーク遅延	10ms
ネットワーク遅延 (CN-Router 間)	30ms
シミュレーション時間	120 秒
ハンドオーバー回数	1 回
ノードの移動速度	50m/s

5.2.2 実験結果

図 10 は移動端末台数ごとのスループットの平均を示したグラフである。提案方式のほうが PMIPv6 と比較して、平均約 37% 向上した。また、移動端末台数によってスループットの向上率に差は見られなかった。

表 7 は LMA が送受信したパケット数を示した表である。提案方式は PMIPv6 と比較して、平均約 9440 分の 1 となった。提案方式では移動端末台数が増加するごとに LMA が送受信したパケット数は 200 ずつ増加したが、PMIPv6 では移動端末台数によつての差はほぼ見られなかった。

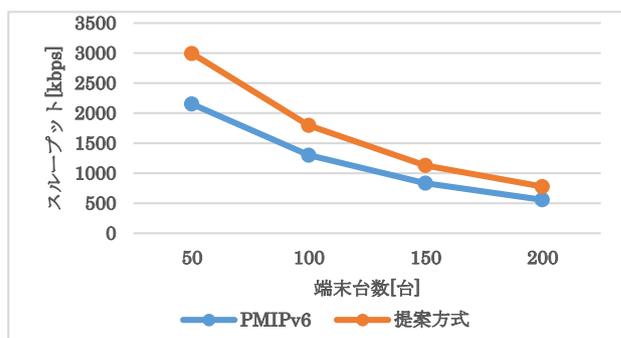


図 10 120 秒間で移動端末が 1 回ハンドオーバーしたときの平均スループット

表 7 LMA が送受信したパケット数

端末台数	PMIPv6	提案方式
50	3,570,946	200
100	3,817,529	400
150	3,680,535	600
200	3,381,956	800

6. 考察

6.1 実験の考察

トンネリング処理における通信遅延の調査実験の結果より、トンネリング処理を用いて通信した場合はスループットが約 1.2 倍向上したことから、トンネリング処理による通信はエンドツーエンド間のスループットを低下させ、通信遅延の原因になることがわかった。

ネットワークスループットと LMA 負荷の調査実験の結果より、提案方式のほうが PMIPv6 よりスループットが約 37% 向上したことから、MN-CN 間の通信経路は OpenFlow の適用による OpenFlow メッセージコストを考慮しても、LMA を経由しないほうがネットワークの性能が向上していると考えられる。また、移動端末の台数によってスループットの向上率に差は見られなかったことから、提案方式では移動端末の台数が増加しても PMIPv6 と比較したスループットは低下しないと予測できる。LMA が送受信したパケット数について、提案方式が PMIPv6 と比べて約 9440 分の 1 になっていたことから、MN-CN 間の通信は LMA を経由しないため、LMA の処理負荷を大幅に軽減できたと考えられる。また、提案方式では移動端末台数が増加するごとに LMA が送受信したパケット数は 200 ずつ増加したことから、LMA が送受信したパケット数は、

$$LMA \text{ が送受信したパケット数} = 100 \times \text{移動端末台数} \times \text{ハンドオーバー回数}$$

と表せる。

6.2 ネットワーク構成の考察

4.3 節で挙げた 2 つのネットワーク構成についての考察を行う。図 5 (a) の場合では LMA に OpenFlow コントローラの機能を実装することで、OpenFlow コントローラの新規設置コストを抑制するとともに、LMA の余剰している処理能力を有効利用する。さらに、図 5 (a) では LMA の拡張を必要とするがハンドオーバー時の Packet In を行う際に PBU メッセージを契機とできるため、図 5 (b) よりも早いタイミングでフローテーブルの更新ができるという利点がある。

図 5 (b) の場合では新規に OpenFlow コントローラを設置することで OpenFlow と PMIPv6 の機能分離を行い、対障害性を向上させることで可用性を高く保つことができるという利点がある。

7. おわりに

本稿ではハンドオーバー時に PMIPv6 および PRO を利用した場合に生じる問題に対して、OpenFlow に着目し PMIPv6 に適用することで通信経路を最適化する手法を提案した。また、提案方式が通常の PMIPv6 と比較して有用性があるかを調べるため、提案方式と通常の PMIPv6 とで、評価実験を行った。その結果、提案方式では PMIPv6 や PRO の問題を解決でき、ネットワーク性能が向上した。したがって、提案方式は通常の PMIPv6 と比較して、有用性があることがわかった。

今後はハンドオーバー時の切断時間がないソフトハンドオーバーの導入を検討している。

参考文献

- [1] 阪田史郎, 矢野由紀子, 栗野潤, 村上卓弥, “高速ハンドオーバー技術動向”, 電子情報通信学会誌, 92 (9), pp.761-767, 2009.
- [2] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko, “Mobility Support in IPv6,” RFC3775, 2004.
- [3] S. Gundavelli, K. Leung, V. Devarapalli, K. Chowhury, B. Patil, “Proxy Mobile IPv6”, RFC4861, 2007.
- [4] J. Rosenberg, H. Shulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley, E. Schooler, “SIP : Session Initiation Protocol,” RFC3261, 2002.
- [5] Open Networking Foundation, “<http://www.openflow.org>”.
- [6] あきみち, 宮永 直樹, 岩田 淳, “マスタリング TCP/IP OpenFlow 編”, オーム社, 2013.
- [7] 湧川 隆次, 村井 純, “Proxy Mobile IPv6 及び周辺技術の概要, 及びその IETF 標準化動向について”, 情報処理学会研究報告, MBL, 2007 (116), pp.83-89, 2007.
- [8] 内田 陽豪, 久松 剛, 朝枝 仁, 村井 純, “Proxy Mobile IPv6 を用いたリアルタイムストリーミングア

グリゲーショ手法”, IC2011, pp.67-74, 2011.

- [9] A. Qin, A. Huang, W. Wu, and B. Sarikaya, “PMIPv6 route optimization protocol,” draft-qin-mipshop-pmipro-01.txt, Nov. 2007.
- [10] J. Abeille and M. Liebsch, “Route optimization for proxy mobile IPv6,” draft-abeille-netlmm-proxymip6ro-01.txt, Nov. 2007.
- [11] ns-2, “<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>”.