

OpenFlow を用いた PMIPv6 ドメイン内における 垂直ソフトハンドオーバー方式の提案と評価

渡辺悠太^{†1} 中村嘉隆^{†2} 高橋修^{†2}

概要：Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) は異なる無線通信規格間のアクセスポイントを切り替えることが可能なネットワーク主導型ハンドオーバープロトコルの一つである。PMIPv6 はモバイル端末の管理を行う Local Mobility Anchor (LMA) とモバイル端末の移動を監視し LMA に通知する Mobility Access Gateway (MAG) によりモバイル端末の通信経路制御を行う。しかし、PMIPv6 はハンドオーバー実行時にアクセスポイントを切り替えるための制御メッセージを LMA と MAG の間で交換する必要があり、通信の一時的な切断が発生してしまう。そこで、本研究ではモバイル端末に搭載されている複数のインターフェースと PMIPv6 ドメイン内のネットワーク機器を高精度に連携させることで、通信の一時的な切断が発生しないハンドオーバー方式を提案する。そのために、高精度なルーティングや柔軟性、拡張性に富んだネットワーク構成が可能な OpenFlow を利用する。提案方式と PMIPv6 の比較評価及びシミュレーションによる評価実験を行い、本研究の有用性を示す。

キーワード：ハンドオーバー, Proxy Mobile IPv6, OpenFlow

Proposal and evaluation of vertical and soft handover method in PMIPv6 domain using OpenFlow

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

Abstract: Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) is one of a network initiated handover protocol which can switch the access points between heterogeneous wireless communication standard. PMIPv6 is composed of Local Mobility Anchor (LMA) and Mobile Access Gateway (MAG). LMA manages mobile terminal, MAG monitors movement of mobile terminal and notifies to LMA. These perform communication path control of mobile terminal. However, temporal disconnection of communication may occur due to PMIPv6 needs to exchange control messages between LMA and MAG at the time of handover for switching between access points. In this study, proposed method uses several interfaces of mobile terminal simultaneous by communication equipment in the PMIPv6 domain cooperate with them. Therefore, we propose a handover method that doesn't occur temporary disconnection of communication. For that, we use OpenFlow which is able to perform precision routing, and flexible and scalable network configuration. We compare PMIPv6 and proposed method and experiment to evaluate by simulator. Accordingly, we show usefulness of proposed method.

Keywords: Handover, Proxy Mobile IPv6, OpenFlow

1. 序論

近年、スマートフォン及びフィーチャーフォンのようなモバイル端末の保有率が増加傾向にあり、数年後にはスマートフォンの保有率が 100% 近くまで上昇すると予測されている[1]。また、モバイル端末の普及や発達に伴い、これを屋外で利用するニーズが高まっている。一般的に、モバイル端末はキャリア各社の基地局に接続することで通話やインターネット等のサービスを利用可能である。

Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) は異なる無線通信規格間のアクセスポイントを切り替えることが可能なネットワーク主導型ハンドオーバープロトコルの一つである。PMIPv6 は Local Mobility Anchor (LMA) と Mobility Access Gateway (MAG) によりモバイル端末の通信経路制御を行う。しかし、PMIPv6 はハンドオーバー実行時にアクセスポイントを

切り替えるための制御メッセージを LMA と MAG の間で交換する必要があり、2 秒程度通信の一時的な切断が発生してしまう。

さて、昨今のモバイル端末は IEEE802.11 (Wi-Fi) と携帯回線 (3GPP/3GPP2) のそれぞれの電波を受信するために、複数のインターフェースを搭載しているものが多い。しかし、複数のインターフェースをハンドオーバー実行時に利用し、通信の一時的な切断が発生しないハンドオーバー (ソフトハンドオーバー) を実現することは現状不可能である。

そこで、本研究ではモバイル端末に搭載されている複数のインターフェースと PMIPv6 ドメイン内のネットワーク機器を高精度に連携させることで、異なる無線通信規格間のハンドオーバー (垂直ハンドオーバー) が実行可能な環境において実現可能なソフトハンドオーバー方式を提案することを研究目的とする。

^{†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
School of Systems Information Science, Future University Hakodate.

2. 要素技術

2.1 Proxy Mobile IPv6

PMIPv6[2]はモバイル端末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ネットワーク主導型ハンドオーバープロトコルの一つである。そのため、モバイル端末はハンドオーバーを実行するための特別な機能を実装せずにPMIPv6を利用できるという特徴がある。また、PMIPv6はLong Term Evolution(LTE)とWi-Fi, IEEE802.16(WiMAX)等、異なる無線規格間の移動をサポートする共通的なモビリティ制御が可能である。PMIPv6ドメイン内では、モバイル端末をMobile Node(MN)、通信相手の端末をCorrespondent Node(CN)と呼ぶ。PMIPv6のネットワーク構成例を図1に示す。

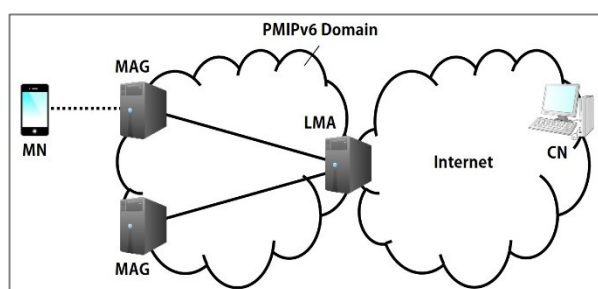


図1 PMIPv6のネットワーク構成例

Figure 1 Network configuration example of PMIPv6

MAG1に接続しているMNがMAG1との接続を切断し、MAG2にハンドオーバーを実行したときの動作手順を図2に示す。PMIPv6では、MNがMAGに接続した時、MAGとLMAの間にトンネルを構築する。このトンネルは接続したMNごとに構築する。これは、MNが通信を行っていない場合においても同様である。

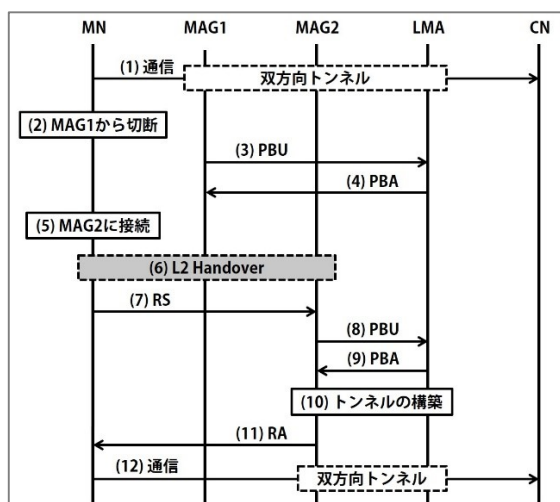


図2 MNハンドオーバー時の動作手順

Figure 2 Operation procedure when MN perform handover

MNはMAG1に接続しており、MAG1とLMAの間に構築されたトンネルを用いてCNと通信している(1)。MNがハンドオーバーを実行し、MAG1との接続を切断した際(2)、MAG1はトンネルを削除するためにProxy Binding Update(PBU)メッセージをLMAに送信する(3)。LMAはトンネルの削除処理を行い、Proxy Binding Acknowledgement(PBA)メッセージをMAG1に送信する(4)。MAG2に接続したMNはレイヤ2ハンドオーバーを完了したとき(5)、(6)、MAG2にRSパケットをMN-Identifier(MN-ID)とともに送信し(7)、Home Network Prefix(HNP)の割り当てを要求する。MAG2はRSパケットの受信を契機にLMAへのMNの接続通知、及びトンネルの構築要求であるPBUメッセージを送信する(8)。LMAは、自身が保持するデータベース上のBinding Cache Entry(BCE)をMN-IDをキーとして検索する。該当するエントリがある場合は、対応するHNPとトンネル設定をPBAメッセージとして送信する(9)。該当するエントリがない場合は、MN-IDとLMAのHNPとMAGのIPv6アドレスの組をBCEとして登録する。その後、MAG2との間でトンネルを構築する(10)。MAG2はPBAメッセージ中に含まれるHNPをもとにRAパケットを生成し、MNに送信する(11)。MNは自身のMN-IDから生成したリンクローカルアドレスと、MAG2から受信したRAパケット中のHNPを組み合わせることでIPv6アドレスを生成する。以上の手順により、MNは移動前と等しいIPv6アドレスを生成できるため、通信を再開できる(12)。

2.2 OpenFlow

OpenFlow[3]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り、OpenFlowスイッチ(OFS)とOpenFlowコントローラ(OFC)から構成される。OpenFlowはネットワーク管理者がソフトウェアを用いて独自に設定を行うことで、ネットワーク機器に共通の動作をさせることが可能であり、ネットワーク全体を一つのソフトウェアによって管理できる。OpenFlowでは、従来パケットを転送していたスイッチ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二つの機能に分離して管理していることが特徴として挙げられる。

OFS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。OFSでは起動時に予め接続・設定されたOFCと制御用の通信経路を確立する。これによりOFSはOFCに対して転送処理の問い合わせが可能となる。OFCは各OFS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。OFS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OFSに送信することによって経路制御を行う。

3. 関連研究

モバイル端末に搭載されている複数のインターフェースの同時利用に関する研究[4]として、福山らはモバイル端末の OS に直接変更を加えることによって Wi-Fi と 3G の同時接続を可能にし、ソフトハンドオーバーを実現している。福山らが用いた具体的な方式は、ハンドオーバー時において一方のインターフェースで通信している際にもう一方のインターフェースでトンネルを準備する手法である。これにより、トンネルを切り替えるだけでインターフェースの切り替えが実現でき、理論的にはパケットロスが発生しないようになる。同じ通信相手に対して同時に複数のインターフェースから経路を分けてパケットを送信するために、iproute2 の仕組みを用いてパケットのルーティングを行っている。iproute2 は Linux のルーティングテーブルを操作可能なパッケージであり、ルーティングテーブルを複数生成し、どのテーブルを参照させるかの参照ポリシーを設定することが可能である。この仕組みを用いることで、Wi-Fi インターフェース用のルーティングテーブルと 3G インターフェース用のルーティングテーブルを生成し、両インターフェースのルートを確認する。パケットごとに Wi-Fi と 3G のどちらのルーティングテーブルを使用するかを参照ポリシーとして設定することにより、同時通信を可能とする。参照ポリシーの設定タイミングを図 3 に、使用する参照ポリシーを表 1 に示す。

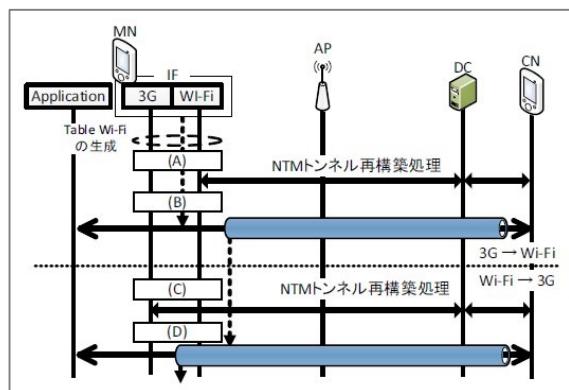


図 3 参照ポリシー設定タイミング
Figure 3 Reference policy set up timing

表 1 タイミングごとの参照ポリシー

Table 1 Reference policy of each timing

タイミング	対象パケット	参照先テーブル
(A)	カプセル化パケット	Table 3G
	その他のパケット	Table Wi-Fi
(B)	全てのパケット	Table Wi-Fi
(C)	カプセル化パケット	Table Wi-Fi
	その他のパケット	Table 3G
(D)	全てのパケット	Table 3G

4. 提案方式

4.1 想定環境

本提案方式ではネットワークとモバイル端末がともに IPv6 に対応していることを前提とする。また、モバイル端末は Wi-Fi と LTE の電波が受信可能なインターフェースを搭載しているものとする。また、想定するモバイル端末の移動ケースは以下のとおりである。

- LTE から Wi-Fi
- Wi-Fi から LTE
- Wi-Fi から Wi-Fi

本提案方式の基本方針は常に LTE インターフェースのコネクションを維持することである。i の場合は、LTE インターフェースのコネクションを維持した状態で Wi-Fi インターフェースがネゴシエーションを開始する。ii の場合は、維持している LTE コネクションにそのまま切り替える。iii の場合は、i と ii の手順に分解して行う。つまり、Wi-Fi から LTE、LTE から Wi-Fi へとハンドオーバーを実行する。

4.2 OpenFlow の実装

本提案方式では OpenFlow を用いてモバイル端末に搭載されている複数のインターフェースと PMIPv6 ドメイン内のネットワーク機器で高精度な連携を行う。そのために、PMIPv6 ドメイン内に OpenFlow を実装する。本提案方式の想定するネットワーク構成例を図 4 に示す。OFS の機能を PMIPv6 ドメイン内の LMA と MAG に実装する。OFC は PMIPv6 ドメイン単位で設置し、その PMIPv6 ドメイン内全ての OFS の機能をもった機器とリンクさせる。

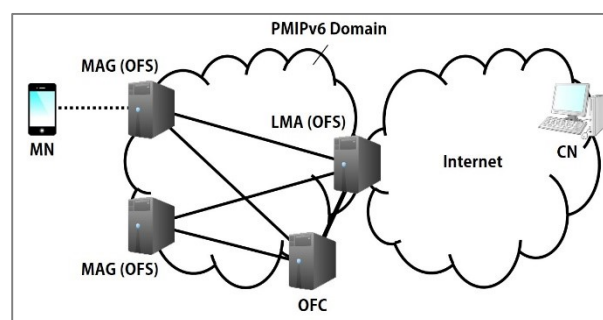


図 4 提案方式のネットワーク構成例

Figure 4 Network configuration example of proposed method

4.3 Wi-Fi アクセスポイントの拡張

本提案方式ではソフトハンドオーバーを実現するために、Wi-Fi アクセスポイントがモバイル端末との dBm 値を監視し、その値の変化に応じて表 2 に示すイベントが発生させる。このイベントは Wi-Fi アクセスポイントから、Wi-Fi ア

クセスポイントが接続している MAG (OFS) に通知される。MAG (OFS) はこのイベントを契機として OpenFlow コントローラに指示を要求する。

表 2 dBm 値に応じたイベント
Table 2 Events corresponding to dBm level

イベント	タイミング	内容
Link Going Up	dBm 値増大時	MN が Wi-Fi AP の通信範囲に近づいた
Link Going Down	dBm 値減少時	MN が Wi-Fi AP の通信範囲から遠ざかった
Link Down	dBm 値大幅減少時	MN が Wi-Fi AP の通信範囲から完全に離れた

4.4 Proxy Mobile IPv6 の拡張

本提案方式では、OpenFlow で利用されるフローテーブルを参照してルーティングを行う。そのため、LMA と MAG の間にトンネルを設定し、パケットをカプセルリング・デカプセルリング処理する必要がなくなる。したがって、LMA から MAG に送信される PBU メッセージを図 5 によりに変更する。具体的には、PBU メッセージ中の Reserved から 1 bit 使用して新規フラグを追加する。このフラグを OpenFlow フラグと定義し、OpenFlow フラグが 1 になっている場合、LMA は MAG とのトンネル構築処理を行わないように実装する。

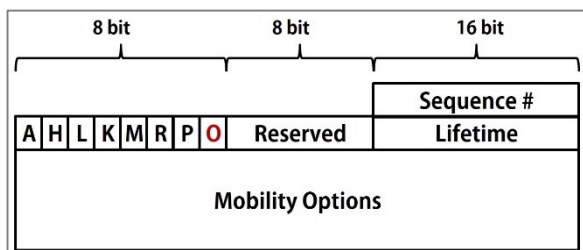


図 5 PBU メッセージの構造
Figure 5 Structure of PBU message

4.5 フローテーブル更新手順

本提案方式は、OpenFlow で用いるフローテーブルを参照してルーティングを行う。フローテーブルは各 OFS が保持し、フローテーブルの更新は全て OFC が指示する。

4.5.1 Wi-Fi 接続時

モバイル端末が Wi-Fi に接続したときの動作とフローテーブルの更新手順を図 6 に示す。また、フローテーブルの更新ポリシーを表 3 に示す。

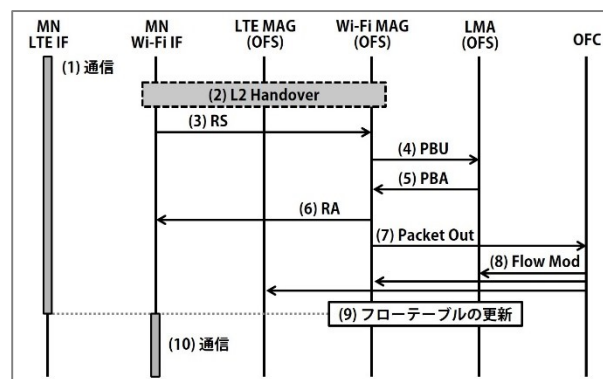


図 6 Wi-Fi にハンドオーバー時のフローテーブル更新手順
Figure 6 Updating procedure of Flow Table at the time of MN performed handover to Wi-Fi

表 3 Wi-Fi ハンドオーバー時のフローテーブル更新ポリシー
Table 3 Updating policy of Flow Table at the time of MN performed handover to Wi-Fi

対象機器	宛先	アクション
LTE MAG (OFS)	MN LTE IF	Drop
	CN	Drop
Wi-Fi MAG (OFS)	MN Wi-Fi IF	Forward MN Wi-Fi IF
	CN	Forward LMA (OFS)
LMA (OFS)	MN LTE IF	Forward Wi-Fi MAG (OFS)
	MN Wi-Fi IF	Forward Wi-Fi MAG (OFS)
	CN	Forward CN Router

初期状態として、MN は自身に搭載されている LTE インターフェース (MN LTE IF) を用いて通信している (1)。(2) から (6) までの手順は 2.1 節の PMIPv6 を用いた MN ハンドオーバー時の動作手順と同様であるため省略する。Wi-Fi MAG (OFS) は RA パケットの送信を契機に Packet Out を送信する (7)。この Packet Out で送信するパケットは、RA パケットを利用することにより、OFC に MN の Wi-Fi インターフェース (MN Wi-Fi IF) に割り当てられた IPv6 アドレスと MN LTE IF が接続している LTE MAG (OFS) を通知できる。OFC はフローテーブルの更新を指示するため LTE MAG (OFS)、Wi-Fi MAG (OFS)、LMA (OFS) に Flow Mod を送信する (8)。LTE MAG (OFS)、Wi-Fi MAG (OFS)、LMA (OFS) はそれぞれ表 3 に従い自身のフローテーブルを更新する。以上の手順により、MN LTE IF から MN Wi-Fi IF へのハンドオーバーが完了し、通信を再開できる (10)。

4.5.2 Wi-Fi 切断時

モバイル端末が Wi-Fi から切断したときの動作とフローテーブルの更新手順を図 7 に示す。また、フローテーブルの更新ポリシーを表 4 に示す。

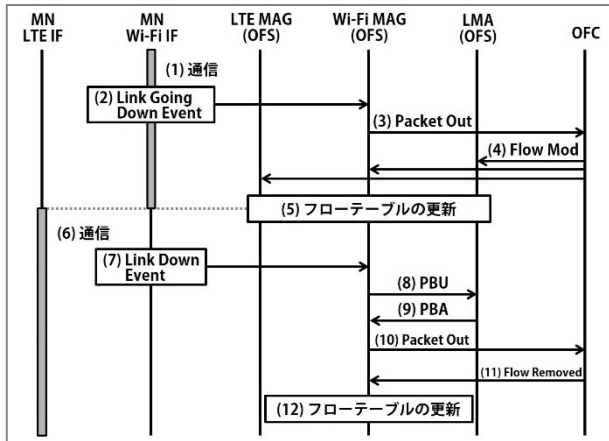


図 7 Wi-Fi 切断時のフローテーブル更新手順

Figure 7 Updating procedure of Flow Table at the time of MN disconnected from Wi-Fi

表 4 Wi-Fi 切断時のフローテーブル更新ポリシー

Table 4 Updating policy of Flow Table at the time of MN disconnected from Wi-Fi

対象機器	宛先	アクション
LTE MAG (OFS)	MN LTE IF	Forward MN LTE IF
	CN	Forward LMA (OFS)
Wi-Fi MAG (OFS)	MN Wi-Fi IF	Drop
	CN	Drop
LMA (OFS)	MN LTE IF	Forward LTE MAG (OFS)
	MN Wi-Fi IF	Forward LTE MAG (OFS)
	CN	Forward CN Router

初期状態として、MN は Wi-Fi IF を用いて通信している (1)。また、LTE MAG (OFS)、Wi-Fi MAG (OFS)、LMA (OFS) はそれぞれ表 3 のフローテーブルを保持している。MN が Wi-Fi の通信範囲から離れ、4.3 節で説明した Link Going Down Event が発生した際、MN Wi-Fi IF は Wi-Fi MAG (OFS) に通知する (2)。Wi-Fi MAG (OFS) は OFC に Packet Out を送信する (3)。OFC はフローテーブルの更新を指示するため LTE MAG (OFS)、Wi-Fi MAG (OFS)、LMA (OFS) に Flow Mod を送信する (4)。LTE MAG (OFS)、Wi-Fi MAG (OFS)、LMA (OFS) はそれぞれ表 4 に従い自身のフローテーブルを更新する (5)。以上の手順により、MN Wi-Fi IF から MN LTE IF へのハンドオーバーが完了する (6)。その後、

MN が Wi-Fi の通信範囲から完全に外れ、4.3 節で説明した Link Down Event が発生した際、MN Wi-Fi IF は Wi-Fi MAG (OFS) に通知する (7)。Wi-Fi MAG (OFS) は MN Wi-Fi IF との接続を切断するための PBU メッセージを送信する (8)。その後、LMA は PBA メッセージを送信する (9)。Wi-Fi MAG (OFS) は PBA メッセージの受信を契機として OFC に Packet Out を送信する (10)。この Packet Out で送信するパケットは PBA メッセージを利用することにより、OFC に MN Wi-Fi IF に割り当てられた IPv6 アドレスと MN Wi-Fi IF が接続している Wi-Fi MAG (OFS) を通知できる。OFC はフローの削除を指示するため、Wi-Fi MAG (OFS) に Flow Removed を送信する (11)。Flow Removed を受信した Wi-Fi MAG (OFS) は自身のフローを削除する (12)、以上の手順により、MN Wi-Fi IF の切断処理が完了する。

5. 評価実験

5.1 実験環境

本実験ではネットワークシミュレータである ns-3 上に PMIPv6 及び提案方式を実装し、比較評価を行う。本実験の比較評価指標として、MN のパケットロス数を採用する。加えて、他の観点からも比較評価するため、MN のスループット、シグナリングオーバーヘッドパケット数を調査する。本実験のシミュレーションパラメータを表 5 に示す。また、本実験のトポロジを図 8 に示す。

表 5 シミュレーションパラメータ

Table 5 Simulation Parameters

パラメータ	数値
有線リンクの帯域幅 (Mbps)	100
有線リンクの伝送遅延 (ms)	0.1
Wi-Fi の帯域幅 (Mbps)	54
LTE の帯域幅 (Mbps)	150
パケットサイズ (byte)	1024
パケット送信インターバル (ms)	0.1
ノードの移動速度 (m/s)	5

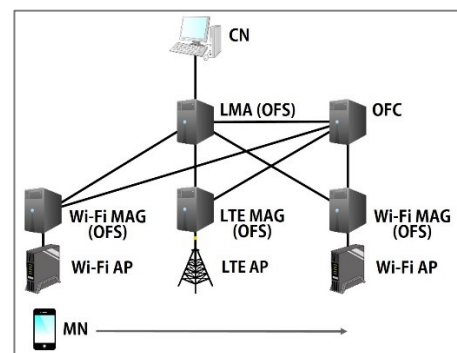


図 8 シミュレーションのトポロジ

Figure 8 Topology of simulation

5.2 実験結果

MN が図 8 に示す二つの Wi-Fi AP 間をハンドオーバーしたとき、提案方式と PMIPv6 を用いた MN の総パケットロス数を図 9 に示す。また、提案方式と PMIPv6 を用いた MN のスループットを図 10 に示す。加えて、提案方式と PMIPv6 を用いた PMIPv6 ドメイン内のシグナリングオーバーヘッドパケット数を表 6 に示す。

パケットは CN から MN に UDP の Constant Bit Rate (CBR) を用いて送信する。提案方式を用いた場合、MN は LTE を一度経由して Wi-Fi 間をハンドオーバーする。PMIPv6 を用いた場合、MN は LTE に接続せずに直接 Wi-Fi 間をハンドオーバーする。

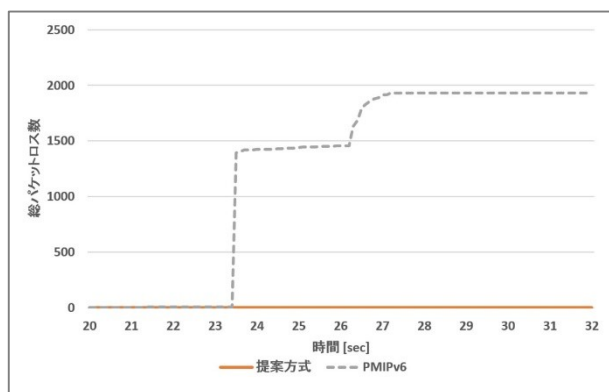


図 9 MN の総パケットロス数

Figure 9 Total number of packet loss of MN

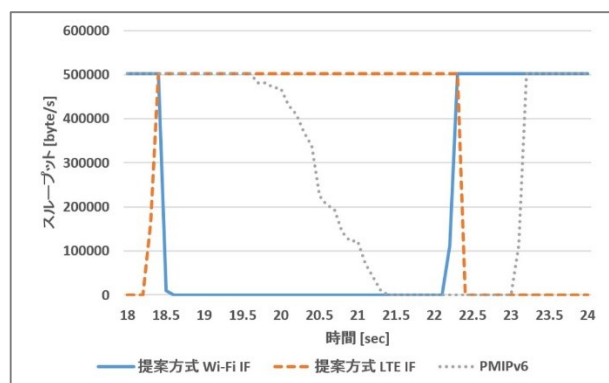


図 10 MN のスループット

Figure 10 Throughput of MN

表 6 シグナリングオーバーヘッドパケット数

Table 6 Number of signaling overhead packets

	提案方式	PMIPv6
シグナリングオーバーヘッドパケット数	23	10

5.3 考察

実験結果から、提案方式は PMIPv6 と比較しパケットロスを発生させずにハンドオーバーを実行可能なことが確認で

きた。また、提案方式は PMIPv6 と比較しスループットを低下させずにハンドオーバーを実行可能なことが確認できた。これらの結果から、提案方式はパケットロスを発生させず、スループットを低下させずにハンドオーバーを実行可能なため、ソフトハンドオーバーを実現できた。ゆえに、ハンドオーバー時において MN に搭載されている複数のインターフェースを同時利用するというアプローチは有効であると考えられる。

しかし、提案方式は PMIPv6 と比較しハンドオーバー時のシグナリングオーバーヘッドパケット数の増大が確認できた。この理由として、提案方式は OpenFlow を PMIPv6 ドメイン内に実装し、ハンドオーバー時のインターフェース間の制御や経路制御に利用したことにより、制御メッセージが増大してしまったためである。したがって、提案方式を用いた場合、ソフトハンドオーバーの実現や PMIPv6 ドメイン内の通信において、MN のハンドオーバー時のスループット向上とシグナリングオーバーヘッドパケット数の増大はトレードオフであることがわかった。

6. 結論

本研究では、モバイル端末に搭載されている複数のインターフェースと PMIPv6 ドメイン内のネットワーク機器を高精度に連携させ同時利用することで、ソフトハンドオーバーを実現する方式を提案した。そのために、OpenFlow を利用することでモバイル端末のインターフェースごとにフローテーブルを定義し、高精度な連携を可能にした。評価実験の結果、提案方式である OpenFlow を実装した PMIPv6 は、パケットロスを無くしソフトハンドオーバーを実現できた。しかし、シグナリングオーバーヘッドパケットは増大してしまった。したがって、本提案方式は、他の方式と比較してソフトハンドオーバーが実現可能ではあるが、ハンドオーバーレイテンシがある程度増大してしまうことがわかった。

今後の検討事項は、Network Functions Virtualization (NFV) を用いて MAG や LMA を仮想化し一元管理することで、制御メッセージを集約しハンドオーバー時のシグナリングオーバーヘッドパケット数を低減できるのではないかと考える。

参考文献

- [1] 総務省, “ICT の進化によるライフスタイル・ワークスタイルの変化”, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/html/nc141110.html>
- [2] Sri Gundavelli, Kent Leung, Vijay Devarapalli, Kuntal Chowdhury, and Basavaraj Patil, “Proxy Mobile IPv6”, IETF RFC 5213, Aug. 2008.
- [3] Open Networking Foundation, “<http://www.openflow.org>”.
- [4] 福山 陽祐, 上醉尾 一真, 鈴木 秀和, 旭 健作, 内藤 克浩, 渡邊 晃, “Android 端末における Wi-Fi/3G 間のシームレスハンドオーバーの提案と実装”, 情報処理学会研究報告, UBI, 2013-UBI-37(27), pp.1-8, Mar. 2013.