

PNEMO-LTE:

LTE-Advanced における DHCPv6-PD を用いたムービングセルの実現

松枝 耕平[†] 金子 晋丈^{††} 寺岡 文男^{††}

[†] 慶應義塾大学大学院 理工学研究科 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

^{††} 慶應義塾大学 理工学部 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

E-mail: [†]baron@inl.ics.keio.ac.jp, [†]kaneko@dmc.keio.ac.jp, [†]tera@keio.jp

あらまし 近年、移動通信において増大する通信トラフィックを収容するためにスモールセルの導入が進められている。電車やバスなどの高速移動体には、中継基地局を車体に設置した移動式スモールセル「ムービングセル」が配備されることが検討されている。そこで本稿では、LTE-Advanced において車内ユーザをまとめて管理するネットワーク制御型ネットワークモビリティプロトコル PNEMO-LTE を提案する。スモールセルを構成する中継基地局ノードに委譲したプレフィックスに属する IP アドレスを移動端末に利用させることで、LTE-Advanced のコアノードが保持すべき経路情報の集約を実現する。ゆえに中継基地局ノードのハンドオーバー時のシグナリングパケットは接続される端末の数に依存しない。本提案方式は、LTE-Advanced の各ノード間インタフェースやシグナリングシーケンスを維持する。各ノードをデーモンとして Linux に実装し、基本性能の評価として移動端末、中継基地局の接続およびハンドオーバーの処理時間を測定した。測定の結果、PNEMO-LTE が TCP ベースのアプリケーションの利用許容パケット遅延時間内で動作するが、音声、ライブストリーミング動画、インタラクティブなゲームでは QoS に課題があることが確認された。

キーワード ネットワークモビリティ (NEMO), Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6), ムービングセル, LTE-Advanced

PNEMO-LTE:

Realization of Moving Cells in LTE-Advanced Network Using DHCPv6-PD

Kohei MATSUEDA[†], Kunitake KANEKO^{††}, and Fumio TERAOKA^{††}

[†] Graduate School of Science and Technology, Keio University 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522 Japan

^{††} Faculty of Science and Technology, Keio University 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522 Japan

E-mail: [†]baron@inl.ics.keio.ac.jp, [†]kaneko@dmc.keio.ac.jp, [†]tera@keio.jp

Abstract The introduction of small cells is underway to mitigate the traffic load in the LTE-Advanced network. Installation of moving cells in trains and buses is under consideration. This paper proposes PNEMO-LTE to manage user terminals in vehicles in the LTE-Advanced network. It realizes route aggregation by assigning the Relay Node an IP address prefix from which the Relay Node assigns a user terminal an IP address. PNEMO-LTE retains the node-to-node interfaces and signaling sequences in the LTE-Advanced network. PNEMO-LTE is implemented as daemons in Linux. Basic performance of PNEMO-LTE such as connection time and handover time was evaluated. As a result, it is confirmed that PNEMO-LTE operates within allowable packet delay time of the TCP-based applications and there is a issue of Quality of Experience (QoE) in with voice, live streaming video, interactive gaming.

Key words Network Mobility (NEMO), Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6), Moving Cell, LTE-Advanced

1. 背景

近年、移動端末の性能向上や高度なサービスの出現、ユーザの QoE (Quality of Experience) 保証の要求に伴い、公衆移動体通信システムは継続的に高速、大容量へと進化を遂げている。3GPP (3rd Generation Partnership Project) [1] Release10, 11 で標準化された LTE-Advanced では、マクロセル内にスモールセルを複数配置することで伝送容量の拡大を実現する。通信トラフィックは今後も増大していき、スモールセルが今後ますます展開されていくことが予想される [2]。

スモールセルの一種にムービングセル (図 1) があり、将来の導入が検討されている。ムービングセルは、電車やバスなどの移動体に中継基地局であるリレーノード (Relay Node: RN) を設置した移動式のスモールセルである。中継基地局を設けるリレー技術は、LTE-Advanced でサポートされた、無線基地局などを有線接続するバックホール回線の確保が困難な場所でセルの対象範囲と伝送容量を向上させる手法である。中継基地局のほか、ユーザが持ち歩くモバイル LTE ルータも RN の一種である。RN が基地局からの電波を受信し車内に送信することで車内の複数ユーザを収容するので、従来は電波の入出がしにくかった車内の状況を改善し、スループットの向上が可能である。RN は、端末と固定基地局の間の中継のほか、端末と同様にアプリケーションを動作させインターネット上の通信相手との通信が可能である。

ムービングセル単位の移動は複数の端末の集合移動であり、ネットワークモビリティに分類される。LTE-Advanced では、ネットワーク制御型ターミナルモビリティプロトコルの Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) [3] を採用しているため、各端末はそれぞれ移動制御のために LTE-Advanced のコアネットワークとメッセージのやり取り (シグナリング) をする。このため、シグナリングが同時に大量発生してシグナリングオーバーヘッドを引き起こす。また、従来のモビリティプロトコルは、ノードの種類やノード間インタフェースといった LTE-Advanced のアーキテクチャを考慮していないものが多数であり、プロトコルをそのまま適用することができない。ネットワーク制御型の移動管理ではネットワーク側の機器が端末のシグナリングを代替するため、端末がモビリティプロトコルをサポートする必要がない。端末の移動範囲は機器が存在するネットワーク内に限定される。これに対し、ホスト制御型の移動管理では端末がモビリティプロトコルをサポートしている必要があり、移動範囲は限定されない。

そこで本稿では、スモールセル内の複数移動端末のモビリティ制御を目的として、Dynamic Host Configuration Protocol v6 Prefix Delegation (DHCPv6-PD) [4] を用いて経路集約を実現するネットワーク制御型ネットワークモビリティプロトコル PNEMO-LTE (Proxy Network Mobility in LTE-Advanced Network) を提案する。提案方式は、LTE-Advanced のアーキテクチャを考慮しており、LTE-Advanced と同様に、Packet Data Network-Gateway (P-GW), Serving-Gateway (S-GW), Donor eNodeB (DeNB), eNodeB (eNodeB), RN,

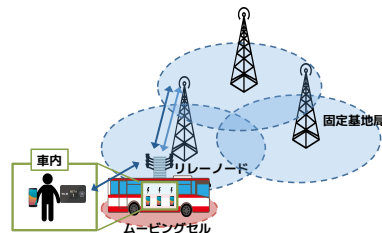


図 1 ムービングセル

表 1 ネットワーク制御型ネットワークモビリティプロトコルの比較

プロトコル	端末の自由移動	LTE-Advanced アーキテクチャ
N-PMIPv6 [5]	考慮	未考慮, mMAG が不適合
N-NEMO [6]	考慮	未考慮, 上流の MR が MAG として動作し不適合
PNEMO [7]	VMN のみ考慮	未考慮
P-NEMO [8]	IP アドレス取得済みの 端末の接続を未考慮	未考慮, S-GW 間 インタフェースが不適合
PMIPv6-NEMO [9]	LFN のみ考慮	未考慮

User Equipment (UE) で構成され、これらの機器間インタフェースおよびメッセージシーケンスを維持する。

2. 関連研究

本章では、既存のネットワーク制御型ネットワークモビリティプロトコルの特徴を述べる。なお、LMA (Local Mobility Anchor) と P-GW, MAG (Mobile Access Gateway) と S-GW, MR (Mobile Router) と RN, MN (Mobile Node) と UE は同義である。各プロトコルの比較を表 1 に示す。

2.1 要求事項

本稿では、次の要求事項を全て考慮した、ムービングセル実現のためのネットワーク制御型ネットワークモビリティプロトコルを提案する。(1) LTE-Advanced のアーキテクチャを考慮、すなわち、各機器間の機能や機器間インタフェース、シグナリング手順を維持、(2) セル内外の UE の移動をサポート、(3) S-GW や P-GW の管理情報量がセル内の RN や UE に非依存、(4) ムービングセルの入れ子をサポート、(5) RN や UE の通信経路が最適。管理する情報量の目標は、ムービングセル内の RN や UE の数に非依存なことである。既存のネットワーク制御型ネットワークモビリティプロトコルに上記の点を全て満足するものはない。

2.2 NEMO-enabled PMIPv6 (N-PMIPv6)

N-PMIPv6 [5] は、PMIPv6 を拡張しネットワークモビリティ (NEMO) のサポートを実現するプロトコルである。N-PMIPv6 では、PMIPv6 を構成するエンティティに加え、mMAG (moving MAG) を導入する。mMAG は PMIPv6 ドメイン内を移動する MAG である。MN が mMAG に接続すると、mMAG が MN のシグナリングを代替する。LMA が保持する Binding Cache Entry (BCE) では、mMAG の ID, MAG の ID, mMAG に割り当てたプレフィックスを管理する。MAG が保持する Binding Update List Entry (BULE) では、接続する mMAG の ID を管理する。mMAG に接続した MN が送信す

るパケットは、LMA-mMAG 間と LMA-MAG 間で多重に確立したトンネルによって転送される。mMAG が入れ子になる場合、mMAG に予めプレフィックスを割り当てておく必要がある。しかし、mMAG がユーザが所持するモバイル LTE ルータである場合、予めプレフィックスを割り当てて管理するのは煩雑であり、アドレス空間の利用効率が低下する。

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

N-NEMO [6] は、N-PMIPv6 の多重トンネルによるヘッダオーバーヘッド、シグナリングコストを低減するプロトコルである。MR が入れ子になる場合、上流の MR は下流の MR に対して MAG として動作する。N-NEMO では、LMA-MAG 間および MAG-MR 間にそれぞれトンネルを確立する、トンネル分離モデルを採用している。LMA はモバイルネットワーク内の全 MN, MR の経路情報を保持するが、この経路情報は集約できない可能性が高い。

2.4 Proxy Mobile Network Mobility (PNEMO)

PNEMO [7] は、PMIPv6 を拡張し NEMO のサポートを実現するプロトコルである。PNEMO における MN は移動端末または移動ルータであり、2 種類に大別される。1 つ目の Local Fixed Node (LFN) は常に同一モバイルネットワークに接続されている MN であり、MIPv6 をサポートしていないため移動できない。2 つ目の Visited Mobile Node (VMN) は MIPv6 をサポートしているため、異なるモバイルネットワークに移動可能である。PNEMO では、モバイルネットワークが入れ子になった場合でも LMA-MAG 間のトンネルのみを生成し、トンネルの多重化を防ぐ。このため、ヘッダオーバーヘッドの大きさは変化しない。トンネルを多重化せずにモバイルネットワークの移動をサポートするために、LMA と MAG は MN が接続する MR の情報をテーブルで管理し、MR は接続される MN の情報をテーブルで管理する。MAG が保持する BULE および MR が保持する NEMO State Table Entry (NSTE) では、ノード ID、プレフィックス、上位ルータ ID を保持する。これらのテーブルを用いて、LMA は通信相手からのパケットを MN まで転送する。PNEMO では、MIPv6 を実装していないノードはモバイルネットワーク間を移動不可である。

2.5 PMIPv6-Based NEMO (P-NEMO)

P-NEMO [8] は、ITS (Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム) 通信のために PMIPv6 を拡張し NEMO のサポートを実現するプロトコルである。P-NEMO は LMA の BCE と MAG の BULE を拡張して、MR に割り当てた HNP を管理する。MR が MAG に接続すると、MR が MAG を中継して LMA に Router Solicitation (RS) [10] を送信し、LMA には MAG を中継して MR に Router Advertisement (RA) [10] を返送する。MR は、受信した RA から HNP と MNP を取得し、MR の下流に MNP を送信する。MAG (S-GW) 間でハンドオーバー時のデータ転送を行うが、LTE-Advanced では S-GW 間にインタフェースは存在しない。また、IP アドレス取得済みの MN が MR に接続する場合を考慮していない。

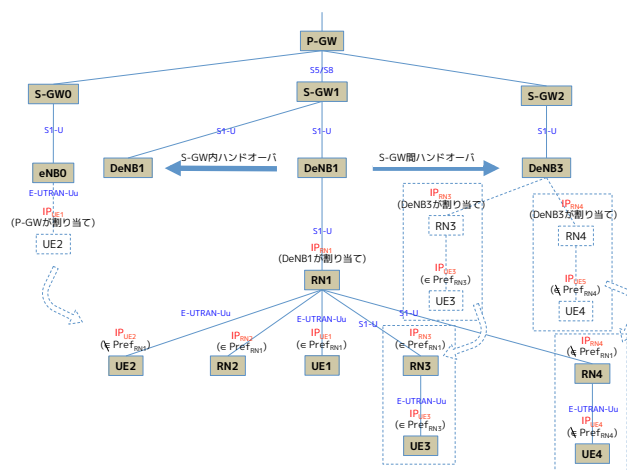


図 2 PNEMO-LTE システム構成

2.6 Prefix Delegation Support for Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6-NEMO)

PMIPv6-NEMO [9] は、PMIPv6 ドメイン内の MR が DHCPv6 を用いてプレフィックスを取得することで NEMO をサポートする PMIPv6 の拡張プロトコルである。MR に接続する VMN は LFN のみである。MR が MAG に接続すると、LMA-MAG 間にトンネルを確立し、LMA から MAG を中継してプレフィックスが MR に委譲される。MR は、委譲されたプレフィックス空間の中から LFN に /64 のプレフィックスを配布する。PMIPv6-NEMO では、MIPv6 を実装していないノードはモバイルネットワーク間を移動不可である。また、IP アドレス取得済みの MN が MR に接続する場合を考慮していない。そしてモバイルネットワークの入れ子を考慮していない。

3. PNEMO-LTE の設計

3.1 概要

PNEMO-LTE は、DHCPv6-PD を用いてムービングセル (モバイルネットワーク) 内の経路集約を実現するネットワーク制御型ネットワークモビリティプロトコルである。IP アドレスでなく IP プレフィックスを割り当てるプレフィックス委譲は IPv6 でのみ規定されているため、本提案プロトコルは IPv6 ネットワークで動作することを想定している。

PNEMO-LTE は LTE-Advanced のアーキテクチャを考慮しており、PNEMO-LTE を構成するエンティティは P-GW, S-GW, MME, DeNB (eNB), RN, UE であり、これらの機器間インタフェースは既存の LTE-Advanced のアーキテクチャと同一である。また、シグナリングに用いるメッセージの種類および手順も原則的に LTE-Advanced に準ずる。3GPP で規定されているユーザプレーンでのみ GRSS Tunneling Protocol (GTP) トンネルを利用するので、ヘッダオーバーヘッドは増えない。システム構成は図 2 のとおりである。

想定する接続パターンは、次のとおりである。

- (1) RN1 (IP アドレス未取得) が DeNB1 に接続
- (2) UE1 (IP アドレス未取得) が RN1 に接続

- (3) RN2 (IP アドレス未取得) が RN1 に接続
 - (4) UE2 (IP アドレス取得済み) が RN1 に接続
 - (5) RN3 (IP アドレス取得済み, RN3 から IP アドレス取得済みの UE3 が下流に接続済み) が RN1 に接続
 - (6) RN4 (IP アドレス取得済み, RN4 の外部で IP アドレス取得済みの UE4 が下流に接続済み) が RN1 に接続
- また, 想定する移動 (ハンドオーバ) パターンは, 次のとおりである.

- (1) S-GW 内ハンドオーバ (同一 MME, 異なる DeNB 間)
- (2) S-GW 間ハンドオーバ (同一 MME)

PNEMO-LTE では P-GW, S-GW, DeNB が P-GW が RN や UE のプレフィックス, IP アドレス, 転送先, ルート RN の情報をマッピング表で管理する. ルート RN はムービングセルの最上位に位置する RN である. マッピング表を利用するため, ハンドオーバ時の更新項目はマッピング表を用いないときに比べ少ない. P-GW は常にトポロジアンカーに設置されるため, RN や UE は常に最適な経路で通信する. RN に接続した下位 RN や UE は RN が保有するプレフィックスの部分空間となるプレフィックスが配布され, それに基づき IP アドレスを生成する. ムービングセル内で下位 RN や UE に配布するプレフィックスは, RN の IP プレフィックスに含有される. このため, RN 内で IP アドレスを獲得した下位 RN や UE によって P-GW, S-GW, DeNB の管理情報は増えない. RN 外で IP アドレスを獲得した下位 RN や UE が RN に接続された場合, 下位 RN や UE は上位の RN と異なるプレフィックスを有するため, P-GW までシグナリングがなされ, P-GW, S-GW, DeNB の管理情報は増える. 2.1 節 (3) の要求事項は完全には満足しないが, 下位 RN や UE の移動透過性が実現される. ゆえに PNEMO では移動を保証していなかった MIPv6 を実装していない VMN のサポートが可能となる. RN の下流に接続される下位 RN, UE を MME に登録するとき, 複数台の登録を一括して実施することでシグナリング packets を削減する.

次節以降で, RN や UE の接続手順, 移動 (ハンドオーバ) 手順を示す. このとき, ノード XX (XX は P-GW など任意のノード名) の下流インタフェースの IP アドレスを IP_{XX}^D , 上流インタフェースの IP アドレスを IP_{XX}^U , ノード XX の下流に確立されるトンネルインタフェースを GTP_{XX}^D , UE 上のアプリケーションが通信相手との接続に使用する IP アドレスを IP_{UE} , RN が UE として動作する際に RN 上のアプリケーションが通信相手との接続に使用する IP アドレスを IP_{RN}^{UE} と表記する. PNEMO-LTE のコントロールプレーンにおける IPv6 アドレスの各表記の場所を図 3 に示す. また, RN が保有し下流に配布するプレフィックスを $Pref_{RN}$ と表記する.

3.2 接続手順

本節では, RN や UE がアプリケーションで使用する IP アドレスを自動生成するまでのシグナリングの手順を示す. 接続手順後, RN や UE 上のアプリケーションはインターネット上の通信相手と接続可能になる. 図 2 における RN3, RN4 の接続パターンは, 紙面の関係で本稿では省略する.

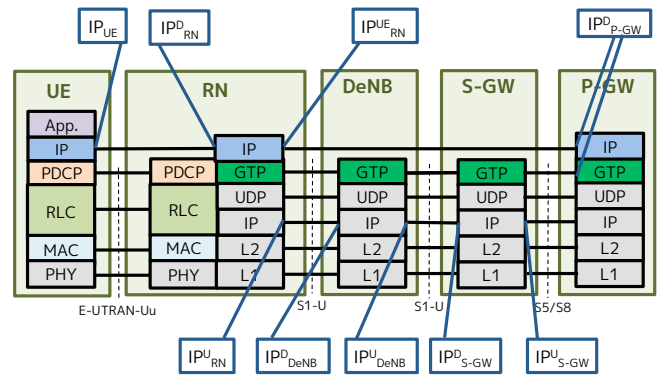


図 3 PNEMO-LTE の IPv6 アドレス表記場所

3.2.1 RN1 (IP アドレス未取得) が DeNB1 に接続

図 2 における IP アドレス未取得の RN1 が DeNB1 に接続する手順を図 4 に示す. RN は DeNB1 接続時にプレフィックスを有していないものとする.

無線回線確立 (図 4 (1)): RN1 と DeNB1 の間に無線回線を確立する.

GTP トンネル確立用 IP アドレスの取得 (図 4 (2)-(4)): DeNB1 はリンクローカル全ルータマルチキャスト宛での RS を送信し, DeNB1 は RN1 に RA を返送する. RN1 は RA を受信すると, 受信したプレフィックスから IP6 アドレス IP_{RN1}^U を生成し, RN1 の上流インタフェースに割り当てる. IP_{RN1}^U は RN が DeNB1 との間に GTP トンネルを確立するために使用する.

GTP トンネルの確立 (図 4 (5)-(14)): P-GW から RN1 までメッセージを交換し, P-GW-S-GW1 間, S-GW1-DeNB1 間, DeNB1-RN1 間に GTP トンネルを確立し, P-GW-RN1 間にユーザパケットの通信経路 (ベアラ) が確立される. IP_{RN1}^{UE} 宛のパケットの転送先をこの GTP トンネルに設定する. この転送先のマッピングは P-GW, S-GW1, DeNB1 のマッピング表が保持する.

IP_{RN1}^{UE} 生成 (図 4 (15)-(17)): P-GW-RN1 間で確立したベアラにおいて RS と RA の交換を行い, RN1 は IP_{RN1}^U を生成し, RN1 の上流インタフェースに割り当てる.

$Pref_{RN}$ 獲得, IP_{RN1}^{UE} 生成 (図 4 (18)-(20)): RN1 は P-GW に Neighbor Solicitation (NS) [10] を送信し, P-GW は RN1 に Neighbor Advertisement (NA) [10] を返送する. RN1 は, 下流に配布するプレフィックス $Pref_{RN1}$ を獲得し, $Pref_{RN1}$ のアドレス空間から IP_{RN1}^D を下流インタフェースに割り当てる.

Route Setup (図 4 (21)-(23)): P-GW から DeNB1 まで Route Setup を送信する. Route Setup は PNEMO-LTE で新たに設けたメッセージであり, $Pref_{RN1}$ の転送先を IP_{RN1}^{UE} に設定する. P-GW, S-GW1, DeNB1 は $Pref_{RN1}$ の転送先を IP_{RN1}^{UE} に関連付け, マッピング表で保持する.

以上の結果, P-GW, S-GW1 および DeNB1 はそれぞれ表 2(a), 2(b), 2(c) に示すマッピング表を保持する. 宛先はユーザパケットの宛先, 転送先は次ホップの宛先, ルート RN は

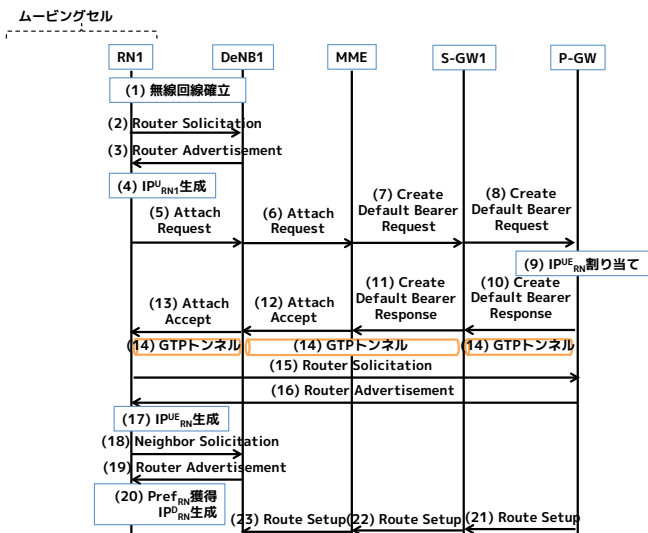


図 4 RN1 (IP アドレス未取得) が DeNB1 に接続する手順

表 2 RN1 (IP アドレス未取得) が DeNB1 に接続後のマッピング表

(a) P-GW が保持するマッピング表

宛先	転送先	ルート RN
IP_{RN1}^{UE}	GTP_{P-GW}^D	-
$Pref_{RN1}$	IP_{RN1}^{UE} 参照	ID_{RN1}

(b) S-GW1 が保持するマッピング表

宛先	転送先	ルート RN
IP_{RN1}^{UE}	GTP_{P-GW}^D	-
$Pref_{RN1}$	IP_{RN1}^{UE} 参照	ID_{RN1}

(c) DeNB1 が保持するマッピング表

宛先	転送先	ルート RN
IP_{RN1}^{UE}	GTP_{P-GW}^D	-
$Pref_{RN1}$	IP_{RN1}^{UE} 参照	ID_{RN1}

ルート RN の ID である。それぞれのマッピング表で異なるのは、宛先が IP_{RN1}^{UE} の場合の転送先の GTP トンネルであるが、GTP トンネルの下流へ転送するという点は同じである。

3.2.2 UE1 (IP アドレス未取得) が RN1 に接続

前述の RN1 接続後の状況に加え、UE1 が RN1 に接続する場合について考える。図 2 における IP アドレス未取得の UE1 が RN1 に入れ子で接続する手順を図 5 に示す。無線回線確立後、UE1 は RN1 と RS と RA の交換を行い、IP アドレスを取得する。一定時間 (例えば 1 秒) 待機後、RN1 は IP アドレスを獲得した UE の情報を複数まとめて MME に通知する。P-GW、S-GW1 および DeNB1 が保持するマッピング表に変化はない。すなわち、マッピング表が保持する情報は、RN が提供するスモールセル内で起動して接続した UE の数に依存しない。

3.2.3 RN2 (IP アドレス未取得) が RN1 に接続

前述の状況に加え、IP アドレス未取得の RN2 が RN1 に接続する場合について考える。図 2 における IP アドレス未取得の RN2 が RN1 に入れ子で接続する手順を図 6 に示す。無線回線確立後、RN2 は RS と RA の交換を行い、 IP_{RN2}^U を取得する。その後、Attach Request や Attach Response の交換によりベアラを確立する。確立したベアラで RS と RA の交換を

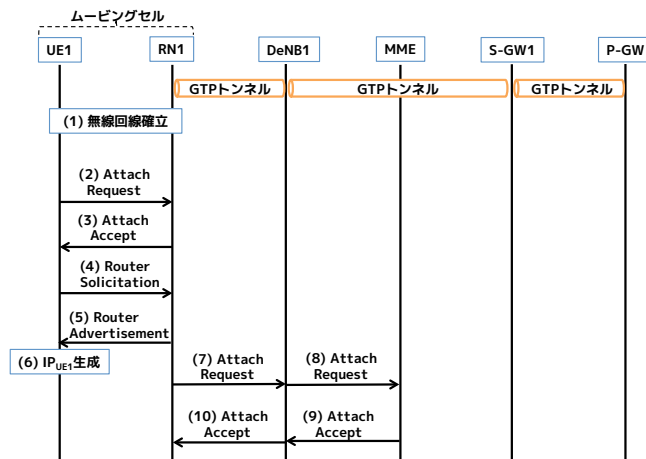


図 5 UE1 (IP アドレス未取得) が DeNB1 に接続する手順

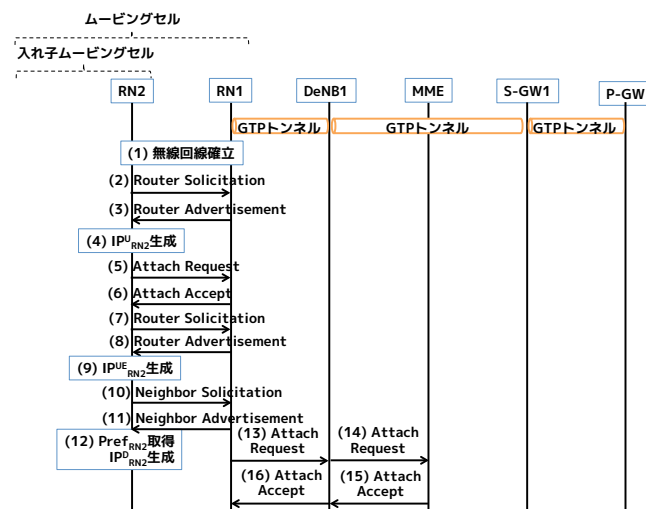


図 6 RN2 (IP アドレス未取得) が RN1 に接続する手順

行い、 IP_{RN2}^{UE} を取得するが、この IP アドレスは IP_{RN2}^U と同様であり、RN2 と RN1 の間に GTP トンネルは確立されない。RN2 は NS、NA の交換を行い、RN1 が保有するプレフィックス空間からプレフィックスを獲得する。一定時間 (例えば 1 秒) 待機後、RN1 は IP アドレスを獲得した RN の情報を複数まとめて MME に通知する。RN2 接続後も、P-GW、S-GW1 および DeNB1 が保持するマッピング表に変化はない。すなわち、マッピング表が保持する情報は、RN が提供するスモールセル内で起動して接続した RN の数に依存しない。

3.2.4 UE2 (IP アドレス取得済み) が RN1 に接続

前述の状況に加え、IP アドレス IP_{UE2} 取得済みの UE2 が RN1 に接続する。 IP_{UE2} は RN1 の保持するプレフィックス $Pref_{RN1}$ に属さないものとする。 IP_{UE2} は $Pref_{RN1}$ に属さないため、P-GW までマッピング表の更新のためにシグナリングが発生する。UE2 が RN1 に接続すると、RN1 は UE2 と接続するインタフェースに、UE2 と /64 のプレフィックスが同一である IP アドレスを割り当てる。RS と RA の交換の後、UE2 は RN1 から新たな IP アドレス IP_{UE2}^{RN1} が得る。 IP_{UE2}^{RN1} は $Pref_{RN1}$ に属する。以降のアプリケーション通信にはこの IP アドレスを使用する。RN1 に接続する前に UE2 と通信していたアプリ

表 3 UE2 (IP アドレス取得済み) が DeNB1 に接続後のマッピング表

(a) P-GW が保持するマッピング表		
宛先	転送先	ルート RN
IP_{RN1}^{UE}	GTP_{P-GW}^D	-
$Pref_{RN1}$	IP_{RN1}^{UE} 参照	ID_{RN1}
IP_{UE2}	IP_{RN1}^{UE1} 参照	ID_{RN1}

(b) S-GW1 が保持するマッピング表		
宛先	転送先	ルート RN
IP_{RN1}^{UE}	GTP_{S-GW1}^D	-
$Pref_{RN1}$	IP_{RN1}^{UE} 参照	ID_{RN1}
IP_{UE2}	IP_{RN1}^{UE1} 参照	ID_{RN1}

(c) DeNB1 が保持するマッピング表		
宛先	転送先	ルート RN
IP_{RN1}^{UE}	GTP_{DeNB1}^D	-
$Pref_{RN1}$	IP_{RN1}^{UE} 参照	ID_{RN1}
IP_{UE2}	IP_{RN1}^{UE1} 参照	ID_{RN1}

ケーションが通信を終了することで、最終的に IP_{UE2} は解放され、経路情報の集約が実現する。

以上の結果、P-GW、S-GW1、DeNB1 はそれぞれ表 3(a)、3(b)、3(c) に示すマッピング表を保持する。

3.3 ハンドオーバー手順

本節では、RN がハンドオーバーする手順を示す。

3.3.1 RN1 が S-GW1 内ハンドオーバー (同一 MME, 異なる DeNB 間)

前述の RN1 の下流に UE1, UE2, RN2 が接続している状況で、RN1 が S-GW1 に接続されている DeNB1 から DeNB2 に接続先を変更する S-GW 内ハンドオーバーの手順を図 7 に示す。

ハンドオーバー先の決定 (図 7 (1) - (3)): 電波強度などから DeNB1 が RN1 のハンドオーバー先を DeNB2 に決定し、ハンドオーバー先の DeNB2 と Handover Request, Handover Request Ack の交換をする。

移動先 DeNB と無線回線確立 (図 7 (4)): RN1 と DeNB2 の間に無線回線を確立する。

GTP トンネル確立用の IP アドレスの取得 (図 7 (5) - (7)): DeNB1 はリンクローカル全ルータマルチキャスト宛での RS を送信し、DeNB2 は RN1 に RA を返送する。RN2 は RA を受信すると、受信したプレフィックスから IP アドレス IP_{RN1}^U を生成し、RN1 の上流インタフェースに割り当てる。 IP_{RN1}^U は RN が DeNB1 との間に GTP トンネルを確立するために使用する。

GTP トンネルの解放、確立 (図 7 (8) - (14)): RN1 から S-GW1 までメッセージを交換し、ハンドオーバー前に S-GW1-DeNB1 間、DeNB1-RN1 間に確立していた GTP トンネルを開放し、DeNB2-RN1 間、S-GW1-DeNB2 間に GTP トンネルを確立する。P-GW-RN1 間に新たなペアアが確立される。以上の結果、DeNB2 は表 4 のマッピング表を保持する。

IP_{RN1}^{UE} 確認 (図 7 (15) - (17)): P-GW-RN1 間で確立したペアアにおいて RS と RA の交換を行い、ハンドオーバー前に

表 4 UE2 (IP アドレス取得済み) が DeNB1 に接続後に DeNB2 が保持するマッピング表

宛先	転送先	ルート RN
IP_{RN1}^{UE}	GTP_{DeNB2}^D	-
$Pref_{RN1}$	IP_{RN1}^{UE} 参照	ID_{RN1}
IP_{UE2}	IP_{RN1}^{UE1} 参照	ID_{RN1}

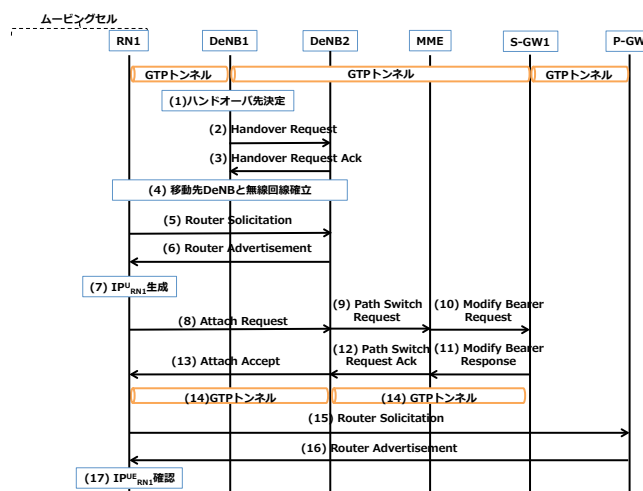


図 7 RN1 が S-GW 内ハンドオーバーする手順

RN1 がアプリケーションとの通信に利用していた IP アドレス IP_{RN1}^{UE} が継続して使用できることを確認する。

3.3.2 RN1 が S-GW1 間ハンドオーバー (同一 MME)

前述のとおり RN1 の下流に UE1, UE2, RN2 が接続している状況で、RN1 が S-GW1 に接続されている DeNB1 から S-GW2 に接続されている DeNB3 に接続先を変更する。この場合、S-GW 内ハンドオーバーの手順に加え、P-GW-S-GW 間のトンネルも張り替える。

4. 実装

UE や RN の接続や移動の一連のシグナリングを実施する P-GW, S-GW, MME, DeNB, RN, UE の各ノードをデーモンとして実装した。ネットワークは図 8 の右図を想定して左図のトポロジを仮想マシン 10 台から構成し、各ノードのデーモンを各仮想マシン上に配置した。各仮想マシンの環境は、OS: Ubuntu Server 14.04 LTS, カーネル: Linux Kernel version 3.13.0-24-generic, コア数: 1 とした。IP アドレス、トンネル、通信経路の設定には、iproute2 [11] のソースコードから関数を作成してデーモンで利用した。ユーザプレーンのプロトコルスタックは、P-GW-S-GW 間および S-GW-MME 間の通信に UDP, DeNB-RN 間, RN-UE 間の通信に TCP を利用して模擬した。また、iproute2 は GTP トンネルをサポートしていないため、確立するトンネルは GRE トンネルで代用した。トンネルを確立する端点となるノードに GRE トンネルインタフェースを作成することで双方向の GRE トンネルとした。

5. 評価

本章では今回実装した PNEMO-LTE における IP アドレス未

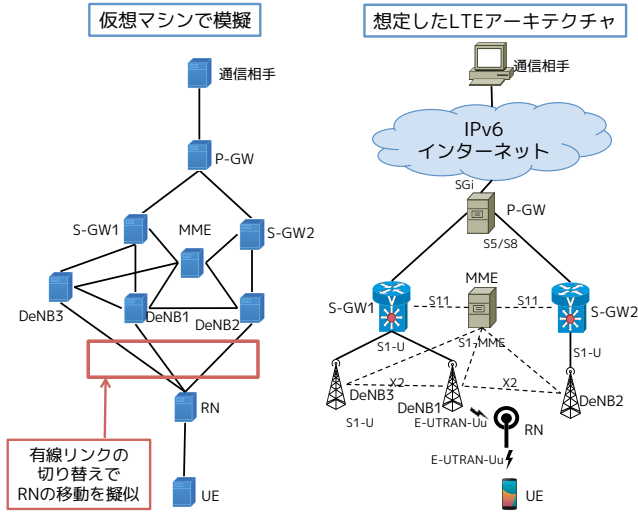


図 8 実装上のネットワーク構成

取得の RN が DeNB に接続, IP アドレス未取得の UE が DeNB に接続, RN の同一 S-GW 内 (同一 MME, 異なる DeNB 間) ハンドオーバーの順序を検証し, その基本性能を評価した。

5.1 評価環境, 項目, 結果

表 8 左図において, P-GW-S-GW 間, S-GW-DeNB 間は複数の中継地を経由して遠距離間で有線接続していることを想定して 25ms, S-GW-MME 間, MME-DeNB 間はそれと比較して近距離間で有線接続していることを想定して 10ms, DeNB-DeNB 間はさらに近距離間で有線接続しているため 5ms, DeNB-RN 間は無線区間の伝送遅延を想定し 10ms, RN-UE 間は近接しているため 0ms の往復遅延時間を設定した。

IP アドレス未取得の RN が DeNB に接続, IP アドレス未取得の UE が DeNB に接続, RN の S-GW 内 (同一 MME, DeNB 間) ハンドオーバーそれぞれに要する時間の計測を行った。RN のハンドオーバーは, DeNB-RN 間の有線リンクの切り替えにより模擬した。

以上の計測をそれぞれ 10 回ずつ行い, 平均値 ± 標準偏差を結果とした。基本性能の評価結果を表 5 に示す。

5.2 考察

実験の結果, 接続およびハンドオーバーが実行可能であることが確認された。

最も処理時間が短いのは, UE (IP アドレス未取得) が DeNB に接続する手順であった。UE は RN と 4 回のメッセージの交換をして IP_{UE} を生成, UE のインタフェースに IP_{UE} を設定するのみのためである。RN (IP アドレス未取得) が DeNB に接続する手順は, UE の場合と比較して GTP トンネル生成や転送先の設定, マッピング表の更新といった手順が加わるため, 処理時間が長くなった。RN が S-GW 内 (同一 MME, DeNB 間) ハンドオーバーする手順は, RN (IP アドレス未取得) が DeNB に接続する手順と比較して P-GW-S-GW 間の処理がないため, 接続に比べ処理時間が短くなった。RN の接続やハンドオーバーの処理を連続で実行しながら ping6 コマンドで通信相手と RN の間の疎通性を確認した所, パケットロスを確認されなかった。3GPP TS 23.203 V13.6.0 によると, 帯域保証

表 5 PNEMO-LTE の基本性能評価結果: 処理時間

評価項目	処理時間 / ms
RN (IP アドレス未取得) が DeNB に接続	235 ± 4
UE (IP アドレス未取得) が DeNB に接続	1 ± 0
RN が S-GW 内 (同一 MME, 異なる DeNB 間) ハンドオーバー	131 ± 2

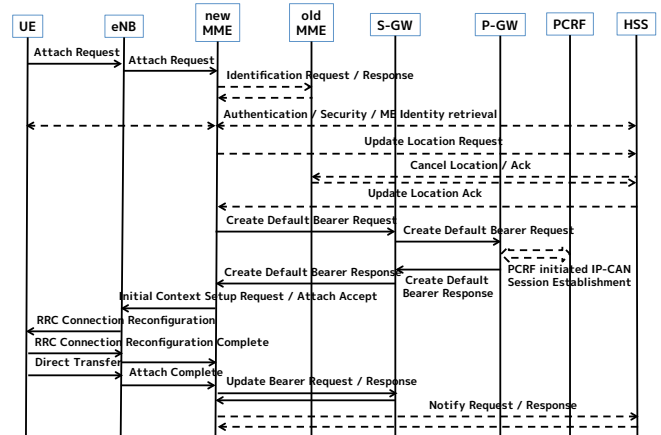


図 9 PMIPv6 における UE の接続手順

表 6 PNEMO-LTE の PMIPv6 との接続, ハンドオーバー処理の比較

比較内容	比較項目	PMIPv6 との比較
UE が eNB に接続	-	PMIPv6 と同等
RN が DeNB, RN に接続	-	PMIPv6 では実現不可
UE が RN に接続	IP アドレス未取得	PMIPv6 と比較して $2RTT_{P-GW-RN}$ 短縮
	IP アドレス取得済み	PMIPv6 と同等
RN がハンドオーバー	シグナリングトラフィック	PMIPv6 のトラフィック量を 1 とすると $1/n$ ($n \geq 1$, n は RN に接続される UE の台数) に削減
	処理時間	1 台: PMIPv6 と比較して $RTT_{RN-DeNB}$ 増加 n 台 ($n \geq 1$): PMIPv6 では台数と時間が比例の関係にあるのに対し台数によらず時間は一定

なし (Non-GBR: Non Guaranteed Bit Rate) の場合の TCP ベースのアプリケーションの許容パケット遅延時間は 300ms であるため, ユーザの QoE は損なわれない。一方, 帯域補償なしの音声, ライブストリーミング動画, インタラクティブなゲームの許容パケット遅延は 100ms であり, S-GW 内ハンドオーバー時間 131ms はこの値を越えるため, ハンドオーバー時にこれらを使用しているユーザの QoE は低下する。

6. PNEMO-LTE と PMIPv6 の接続, ハンドオーバー処理の比較

本節では PNEMO-LTE における接続, ハンドオーバーの処理について, 現在 LTE-Advanced で採用されている PMIPv6 と比較する。PMIPv6 との比較を表 6 に示す。処理時間は各ノード間の往復遅延時間のみを考慮し, ノード毎の処理にかかる時間は無視している。これ以降, 任意のノード X-Y 間の往復遅延時間を RTT_{X-Y} と表記する。プロトコルの比較のために, PMIPv6 における UE の接続と UE の S-GW 内ハンドオーバーの手順をそれぞれ図 9, 10 に示す。

6.1 UE が eNB に接続

本稿では PNEMO-LTE における手順を省略しているが, RN

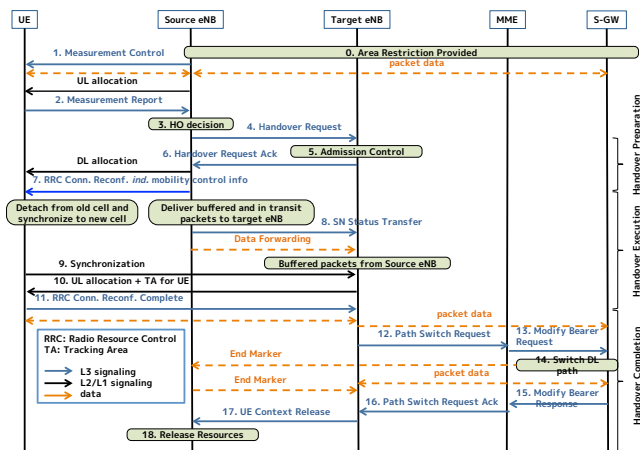


図 10 PMIPv6 における S-GW 内ハンドオーバ（同一 MME 内，DeNB 間）

が DeNB に接続する図 4 と同様であり，PMIPv6 と手順は同じである。

6.2 RN が DeNB, RN に接続

PMIPv6 では RN を考慮していないため，PMIPv6 では実現不可である。また，RN が入れ子で RN に接続する場合も PMIPv6 では実現不可である。このため，本節では比較しない。

6.3 UE が RN に接続

PNEMO-LTE で UE が RN に接続する事象と PMIPv6 で UE が eNB に接続する事象は，UE が LTE-Advanced のネットワークに接続して IP アドレスを取得するという点で同等であるので，両者を比較する。

6.3.1 UE が IP アドレス未取得の場合（図 5 参照）

PNEMO-LTE の場合，RN に委譲したプレフィックス空間から UE が IP アドレスを獲得するために，UE は RN とシグナリングを行う。PMIPv6 の場合，RN にプレフィックスの委譲がないため，アンカーポイントである P-GW までシグナリングする必要がある。PNEMO-LTE のシグナリングは PMIPv6 と比較して $2RTT_{P-GW-RN}$ 短縮される。

6.3.2 UE が IP アドレス取得済みの場合

PNEMO-LTE では，IP アドレス取得済みの UE が RN に接続した場合，RN から移譲されるプレフィックスから新たな IP アドレスを取得し，以降のアプリケーション通信では新たに獲得した IP アドレスを利用する。しかし，取得済みであった IP アドレスは RN が保持するプレフィックス空間に属していないため，通信経路は確立されていない。よって，RN 接続前からの通信の継続のために P-GW までシグナリングして通信経路を設定する必要がある。ゆえにシグナリング手順は PMIPv6 と同様である。

6.4 RN がハンドオーバ（図 7 参照）

PNEMO-LTE で RN および RN に接続されている UE がハンドオーバする事象と PMIPv6 で UE がハンドオーバする事象は同等であるので，両者を比較する。PMIPv6 では UE-eNB 間にトンネルはないため，図 7 の (5) や (6) での RS と RA の交換は行わない。このため PNEMO-LTE では，PMIPv6 と

比較して RN と DeNB の間の往復遅延時間だけ処理時間が増加する。PNEMO-LTE では RN が UE のハンドオーバを代替して行うため，ハンドオーバの処理時間は UE の台数に依存せず一定である。一方の PMIPv6 では，UE それぞれに対しハンドオーバのシグナリングおよびトンネルの確立を行う必要がある。また，シグナリングトラフィックも PNEMO-LTE では UE の台数に依存せず一定であるのに対し，PMIPv6 ではおおむね UE の台数分だけシグナリングトラフィック量が増加する。

7. まとめ

本稿では，ムービングセルを実現すべく，スモールセル内の複数移動端末の経路集約を可能とするネットワーク制御型プロトコルを提案した。LTE-Advanced のネットワークを模擬した環境で基本動作検証，性能評価を行った結果，RN や UE の接続，ハンドオーバの基本動作を確認し，シグナリングの回数が削減可能である見通しを得た。本稿におけるハンドオーバは通信路の切り替えのみを考慮しており，ハンドオーバ時には DeNB から RN や UE に対して送信できないパケットが発生する可能性がある。今後は，ハンドオーバ直前に移動元 DeNB から RN および UE に送信しきれなかったパケットに対し，移動元 DeNB が X2 インタフェースや S1-U インタフェースを用いて，移動先の DeNB に転送する機能を設計，実装をする必要がある。

謝 辞

本研究成果は，ソニー株式会社との共同研究によるものであり，ここに謝意を表す。

文 献

- [1] 3GPP. <http://www.3gpp.org>.
- [2] 総務省. 我が国の移動通信トラフィックの現状. http://www.soumu.go.jp/main_content/000279409.pdf, March 2014.
- [3] S. Gundavelli, K. Leung, V. Devarapalli, K. Chowdhury, and B. Patil. Proxy Mobile IPv6. RFC 5213, IETF, June 2008.
- [4] R. Droms, J. Bound, B. Volz, T. Lemon, C. Perkins, and M. Carney. Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6), 2003. RFC3315.
- [5] I. Soto, C. Bernardos, M. Calderon, A. Banchs, and A. Azcorra. NEMO-Enabled Localized Mobility Support for Internet Access in Automotive Scenarios. *IEEE Communications Magazine*, 47(5):152–159, May 2009.
- [6] Z. Yan, H. Zhou, and I. You. N-NEMO: A Comprehensive Network Mobility Solution in Proxy Mobile IPv6 Network. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 1(2):52–70, October 2010.
- [7] T. Arita and F. Teraoka. PNEMO: A Network-Based Localized Mobility Management Protocol for Mobile Networks. *Journal of Information Processing*, 20(2):1–11, March 2012.
- [8] J. Lee, T. Ernst, and N. Chilamkurti. Performance Analysis of PMIPv6-Based Network Mobility for Intelligent Transportation Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(1):74–85, January 2012.
- [9] X. Zhou, J. Korhonen, C. Williams, S. Gundavelli, and C.J. Bernardos. Prefix Delegation Support for Proxy Mobile IPv6, 2014. RFC7148.
- [10] W. Simpson, T. Narten, E. Nordmark and H. Soliman. Neighbor Discovery for IP version 6 (IPv6), 2007. RFC4861.
- [11] iproute2. <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/iproute2>.