

エッジ経由の通信経路を考慮した次世代モバイル網制御手法に関する研究

A Research on Control Methods Considering Edge Computing for Next Generation Mobile Network

馬場 亮太[†]
Ryota Baba関谷 勇司[†]
Yuji Sekiya石原知洋[†]
Tomohiro Ishihara堀場勝広[†]
Katsuhiko Horiba

1. はじめに

現在、5G の普及に伴い、より高度で信頼性のある通信が期待されている。5G では、超高速通信、多数同時接続、超低遅延の 3 つの利点が掲げられており、応用分野は多岐にわたると考えられる。しかし、これらの利点のうち、超低遅延を実現するには現在の携帯網では困難である。携帯網では、GTP プロトコルにより回線交換方式に準ずる構成をとっており、エッジ経由の通信経路への伝搬の難しさが要因である。そのため、本研究ではパケット網制御手法を携帯バックホール網のアーキテクチャに応用し、現在のモバイル網に最適な構成について検討及び提案を行う。

[1][2]

2. エッジコンピューティング

まず、エッジコンピューティングとは Multi-access Edge Computing の略から MEC とも呼ばれる。既存のクラウドコンピューティング等によるパケット交換とエッジコンピューティングによるパケット交換の違いについて述べる。従来のクラウドコンピューティング技術ではインターネット側に設置されたクラウド環境から配信を行う。具体的にはクラウドを提供している会社のデータセンターまでインターネットプロバイダなどの通信網を介して通信を行っている。これにより、データが通過するルータの数が増えて遅延が生じてしまう。これに対してエッジコンピューティングは端末が接続している通信網の近くにサーバを設置し、サービスを提供することで低遅延かつ、大容量な通信を実現できている。物理的に通過するルータの数が減ることによって低遅延化するだけでなく、近くのサーバで本来端末が行うべき計算を代わりに行うことによって、通信するデータの量がネットワーク全体で減るため大容量化も見込める。

ただ、現在のモバイルのネットワークでは、端末の近くにエッジサーバを置くことが難しい構造をとっており、現在のモバイルのネットワークにエッジコンピューティングを応用することは現実的ではない。また、端末の近くにエッジサーバを置くため、大規模な設備投資が必要となることも課題である。[3]



図 1 エッジコンピューティング

3. モバイルネットワーク

4G の規格において各基地局はサービングゲートウェイ (SGW) に接続されている。また、SGW はユーザデータパケットをルーティングして転送する一方で、基地局間のハンドオーバー時におけるモビリティアンカーとして機能している。つまり、図 2 で示したように、通信事業者が提供しているネットワークにおいて基地局間と SGW・PGW (SPGW) では回線交換方式をとっていることになる。

このような方式をとっているのはモバイルの端末が基地局間を頻繁に移動することが要因として挙げられる。アプリケーション (App) 側から見た場合、頻繁に移動する端末の位置を正確に理解し、ルーティングを逐一行うよりも、一度端末の位置を正確に理解している一つのノード (SPGW) にパケットを集めてしまう方が効率が良いからである。通常、電話回線で用いられている回線交換方式は移動体通信でも相性が良く、現在までこのような方式がとられ続けている。しかし、何千万台の端末がつながるようになった現在のモバイルネットワークにおいて一度パケットを一か所に集める方式は効率的だといえるのだろうか。また、今後 IoT 端末の普及によりさらに接続される端末数は増加すると考えられる。

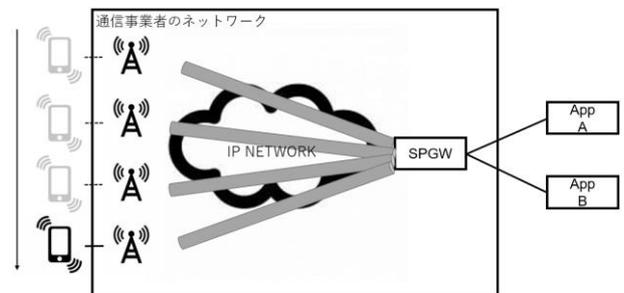


図 2 4G のネットワーク

図 3 に示したように第 5 世代のネットワークでは分散システムをとるアプリやマルチクラウドとの通信が当たり前になると考えられる。そこで、5G では低遅延化を実現するために、複数のサーバのために複数の出口 (UPF) と回線を確立する方式が必要になる。ただ、アプリが起動するたびに回線を張り直すことは非現実的である。また、どのパケットをどの出口から出すのか制御することも難しいと考えられる。このように、アプリケーションの進化によって、回線交換ベースの移動体通信モデルには限界が来ており、5G の技術を実現するためにも新しいアーキテクチャの検討が必要である。[5]

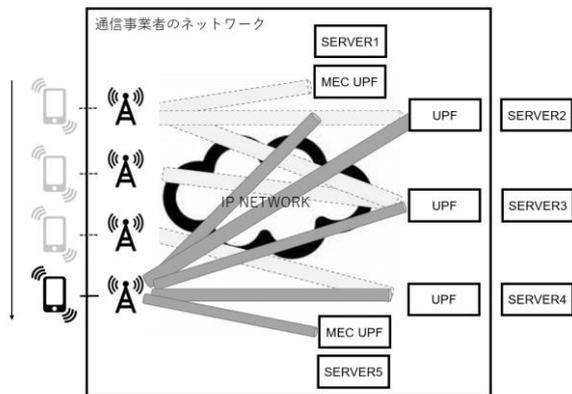


図3 5Gのネットワーク

4. IP 経路制御的アプローチ

5G のネットワークでは、回線交換モデルでこのまま通信を行うことは難しいと考えられる。そのため、パケット交換モデルを応用し、モバイルネットワークをより効率化できないか考える。つまり、通常のインターネットで用いられている経路制御の protocols をモバイルネットワークに応用するというのである。これにより、何度も回線を張り直す必要がなくなり、複雑な制御を行う必要がなくなる。ただ、モバイルと通常のインターネットではやり取りされるデータに違いがある。それは、端末が頻繁に移動することにより、違いが生じている。モバイルネットワークにおいて端末が頻繁に移動することにより、端末は異なる基地局と通信を行う必要がある。そのため、ルーティングを行うためには異なる基地局と通信する度に、端末とどの基地局が接続しているのかルータに対して知らせなければならない。モバイルのネットワークにおいてこのような再接続を行ったことをハンドオーバーといい、一つの通信事業者で1時間に2億回このハンドオーバーが起きる。そのため、この規模のメッセージ量を適切に処理し、素早くルーティング処理を行うことができるのが課題である。

5. Border Gateway Protocol (BGP)

次世代のモバイルのネットワークにおいて border gateway protocol(BGP)というルーティングアルゴリズムを用いることによって最適化することを考える。BGP は、パスペクタ型ルーティングプロトコルである。パスペクタ型では、宛先ネットワークまでに経由する AS が少ない経路をベストパスとして使用している。下の図の例でいえば AS1 から AS2 に行きたい場合、当たり前だが AS3 を通らない経路選択をするようにできている。この例は非常に小さいネットワークの例だが大規模になっても同様な処理をする。今説明したものは図中の eBGP のことを表しており、AS 内部のルーティングを行う iBGP というものもある。このように AS 単位でルーティングを行うことによってルーティングに必要な経路情報のやり取りを削減することができているのである。このように iBGP と eBGP を組み合わせることによってモバイルネットワークでルーティングを効率的に行えると考えられる。[4]

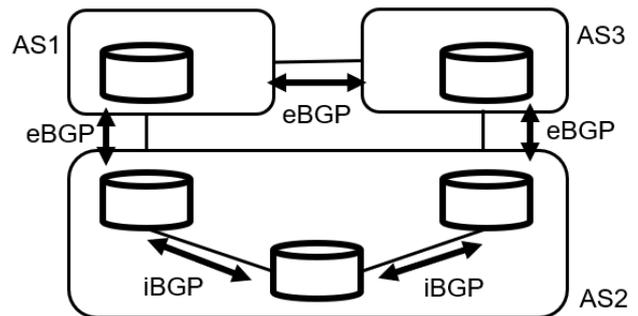


図4 BGP を用いたルーティング処理

6. 関連研究[6]

この研究では現在のモバイルネットワークにおける GTP というプロトコルの問題点を提示し、その代わりとなる手法を紹介している。現在のモバイルの通信においてすべてのモバイル端末から送られたパケットは GTP と呼ばれるプロトコルによって作られたトンネルを通り、一度通信事業者が管理するコアルータに集約されている。その集約後、インターネットにパケットが送られ、宛先に届けられる。この仕組みによって、モバイル端末が移動し、別の基地局と通信をした場合であっても中央にあるコアルータはモバイル端末がどこから通信をしているのか把握することができている。ただ、今後の 5G のネットワークではよりユーザに近い位置での情報処理が必要となるため、GTP プロトコルを用いない Distributed Mobility Management (DMM) というアーキテクチャを提案している。

6.1 PMIPv6 ベースの DMM

Proxy Mobile IPv6 は、ローカルモビリティアンカー (LMA) と呼ばれるコアエンティティがアクセスネットワークに配置されたモビリティアクセスゲートウェイ (MAG) との双方向トンネルを確立する集中型モビリティ管理プロトコルである。ユーザの送ったデータパケットは、対応する MAG によって収集され、トンネルを介して LMA に送信され、LMA はそれらをインターネットに転送する形をとっている。

PMIPv6 ベースの DMM ソリューションでは、MAG の役割が DMM ゲートウェイに置き換えられている。DMM-GW は、LMA を通過せずにインターネットへのリンクを張ることができるため、MAG より優れた機能を有しているといえる。したがって、DMM-GW は、インターネットとの間でパケットを転送するためのトンネリングをせずに機能する。また、DMM-GW はモビリティアンカー機能を備えており、MN が接続中に開始した IP フローを中断することなく転送してから、新しい DMM-GW に移動できる。さらに、PMIPv6 の LMA は、コントロールモビリティデータベース (CMD) と呼ばれるコントロールプレーンのみのエンティティに集約されている。CMD は、すべての MN について、設定された MN のプレフィックス、各プレフィックスを設定した DMM-GW、および MN が現在接続されている DMM-GW を格納することができる。

MN が DMM-GW1 と接続し、ハンドオーバーの後 DMM-GW2 と再接続する過程を示している。再接続後は DMM-GW2 と DMM-GW1 でトンネリングを行っており、これによって古い IP フローを引き継ぐことができるようになる。

6.2 ルーティングベースの DMM

ルーティングベースの基本的な概念は、アーキテクチャからアンカーを削除し、端末が IP ルーティングプロトコルを使用して移動したときに、すべてのネットワークノードが新しいルーティングマップを再確立できるようにすることである。この目的のために、ボーダーゲートウェイプロトコル (BGP) とドメインネームシステム (DNS) を用いて構築されたアーキテクチャを使用している。これは、アクセスルーター (DMM-GW) で BGP を有効にして、ルートの変更を BGP ピアルーターに伝播することで実現される。

前の 2 つの手法とは異なり、MN の位置はすべてのルータに知らされるため、トンネリングのプロトコルやコアルータのようなものは必要ではなくなる。

7. 提案手法

本研究では、パケット交換網の基盤技術である、IP (Internet Protocol) を携帯網に導入するに於けるアーキテクチャ提案を行った。従来の携帯網は、回線交換網を基盤とした技術によって形成されており、パケット交換網への以降が行われている環境においても、個々の UE (User Equipment) に対してパケットカプセル化技術 (トンネル技術) を用いて通信路を形成するといった、回線交換方式に準ずる制御手法が用いられている。

しかし、このような手法は規模性や耐障害性において問題を有している。トンネル技術を使った通信路形成では、UE となるデバイス数が増加するほど、トンネルを終端する装置に通信が集中する構成となる。つまり、パケット網であったとしてもすべての通信はトンネル終端装置に集中するため、デバイス数が増加するに従い、終端装置の台数を増やした分散処理が必要となる。また、終端装置の障害による通信断を防ぐために、終端装置の冗長化や通信経路の冗長化といった、構築と管理コストの増大につながる構成となる。

パケット交換網は本来自立分散的な通信経路構成機能を備えており、IP の場合には経路制御プロトコルによって自立分散的にそれぞれのルータが最適経路を計算することで、通信制御と通信路の冗長化を確保している。すなわち、集中制御ではないため、ルータと通信路を増やした場合にも管理コストを増大させることなく、通信網を拡大できるという特性を有している。この特性こそがインターネットを世界規模のネットワークにまで発展させた理由であり、携帯網のバックホール部分においてもこの特性を活かしたアーキテクチャを導入することで、Layer 3 技術本来の利点を活かした、規模性と管理性、冗長性に優れたネットワークを構築することができると考えた。

本研究では、まず携帯の制御網をパケット交換網 (IP ネットワーク) を用いて構築するにあたって必要となる要素技術の検討と検証を行った。IP ネットワークの上で SRv6 (Segment Routing for IPv6) といったトラフィックを柔軟に制御する技術を適用することにより、規模性、管理性、冗長性に優れた携帯網アーキテクチャを実現できると考えた。

経路制御は IP 網の最大の機能であり、経路制御によって規模性と冗長性が実現される。本研究では、Beyond 5G の携帯網を支える経路制御技術として、広域経路制御に用いられる BGP (Border Gateway Protocol) を用いることを提

案した。これは、BGP は全世界規模の広域経路制御に用いられている技術であり、百万近い規模の経路情報を世界中に伝播させるために利用されている。また、経路情報のみならず様々な付加的な属性情報を伝搬するためにも利用されており、オーバーレイネットワークである VXLAN + EVPN や MPLS といったトラフィック網を制御するためのプロトコルとしても利用されている。そのため、携帯網のシグナリングを行わせることも可能であると考えた。

一方で、BGP はインターネットの経路制御に特化された技術でもあるため、その速度性能や構築アーキテクチャがそのまま携帯網の制御に適用できるわけではない。したがって、携帯網におけるシグナリング (コントロールプレーン) メッセージがどの程度の頻度や流量で行われているのかを考慮し、携帯網の制御に適したパラメータ設定と改良を行う必要があると考えられる。

そこで、まず現状の BGP を携帯網制御に用いることによる、規模性と制御性能の実現性に関する評価を行った。

7.1 想定される規模性と性能

現在日本全国をカバーする 5G の携帯網は、まだどの携帯キャリアも実現できていない。そこで、現在日本全国をカバーしている携帯網である、4G(LTE) のデータをもとに、どの程度の規模性と性能値を実現する必要があるのかを定義することとした。具体的には、次の要素に関して考察を行い、目標値を定義した。

- 規模性
 - 携帯網につながるデバイス数
 - 1 台の基地局で収容するデバイス数
 - 基地局を束ねて回線を終端する局舎ルータ台数
 - 基幹ネットワークを構成するコアルータ台数
- 性能値
 - デバイスの移動量
 - デバイスの移動速度 (デバイスが無切断でハンドオーバーするための切り替え時間)
 - ハンドオーバー時のメッセージ流量

これらの目標値を設定するにあたり、現在のソフトバンク社の 4G(LTE) 網におけるデータを参考とした。利用したデータを表 1 に示す。

表 2 日本国内 4G 網概要値

	日本全国 (100%)	鳥取県 (1%)
端末数	30,000,000	300,000
基地局数	250,000	2,500
ルータ数	1,800	18
ハンドオーバー数 (回/h)	200,000,000	2,000,000
収容基地局数 (台/ルータ)	14,400	144
収容端末数 (台/局)	12,000	120

このデータを用いて、前述の通りまずは経路制御において定義した目標値が達成可能か、現状の BGP で達成が難しいのであれば何を改善すべきかを調査検討するための実験を行った。日本全国の値を用いてシミュレーションを行うためには高性能な実験環境が必要であったため、まずは日本全国の人口に対する人口比 1% の鳥取県を対象として、BGP による網制御 (コントロールプレーン) の実験を行った。

また、性能値に関しては以下のパラメータを実験によって詳細に精査する必要があることがわかった。そのため、下記パラメータを詳細に調査し、モデル化することとした。

- a. 既存 BGP ルータにおける BGP 処理時間
 - i. メッセージ受信時間
 - ii. パス選択における最短経路定義時間
 - iii. 経路表 (RIB) への反映時間
 - iv. メッセージ送信時間
- b. 携帯網におけるメッセージ流量
 - i. 初期接続時
 - ii. 基地局間ハンドオーバー時
- c. 4G 網にてハンドオーバーによる経路広告が収束するまでの所要時間

8. 実験環境

BGP の性能値を決定するために Quagga を用いてエミュレーションを行った。まず、7 章の a. 既存 BGP ルータにおける BGP 処理時間を測定し、経路計算時間とメッセージ交換時間の関係について考察した。次に、7 章の b. 携帯網におけるメッセージ流量をハンドオーバー数から求め、c. 4G 網にてハンドオーバーによる経路広告が収束するまでの所要時間を計測した。また、今回は日本全国の 1% である鳥取県のみを範囲に限定し、実験を行うこととする。

8.1 BGP 処理時間

この実験では図 5 に示したように 3 台の BGP ルータを用いている。ルータ 2 にてパケットの監視を行い、経路情報を受け取り開いてから、update されるまでの時間を測定する。ルータ 3 からは経路の update が 1、10、100、1000、10000、100000 ルートのように増加させることで処理時間にどのような影響を与えるか観察する。また、処理時間の中でそれぞれが占める割合について比較する。

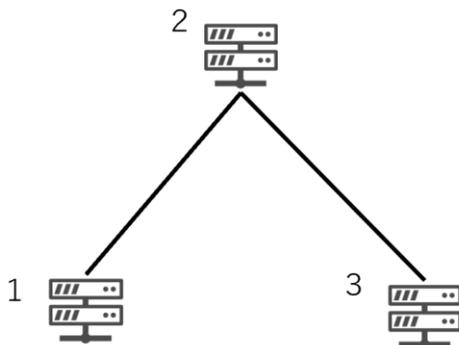


図 5 処理時間測定のためのトポロジー

8.2 経路広告が収束するまでの所要時間

この実験では、表 1 で示したように日本全国の 1% を想定し、BGP ルータを配置した。具体的には図 6 に示した。一番上に BGP ルータ 2 台を配置し、その下に基地局を統括する BGP ルータを 15 台配置している。そして、端末がハンドオーバーし、経路情報が下から伝えられることを模して BGP ルータに経路情報を流すものとする。この経路情報とは、1 時間に日本全国で 2 億回ハンドオーバーが起きることを前提としている。各 BGP ルータには秒間 40 回ハンドオーバーによる経路情報が伝えられることとなる。このような構成で経路広告が収束するまでの時間を測定する。

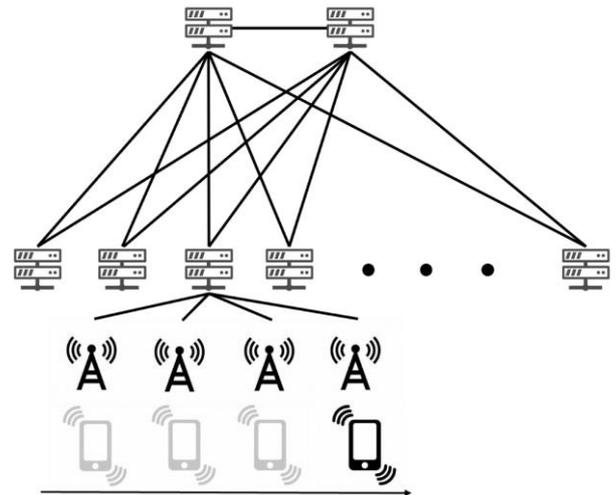


図 6 日本全国の 1% を想定した構成図

9. 実験結果

まず、8.1 の環境において経路広告の数を増加させていくと図 7 のような結果となった。図より、経路広告数が 10 万を超えると大幅に遅延が発生することがわかる。この原因としては、受信側のウィンドウサイズを超えて一度に送信してしまったことによる遅延だと考えられる。また、1 秒間に一つのルータに対して 10 万ルートが一度に送信されることは日本全国のネットワーク構成から考察しても極めて稀である。そのため、1 万ルートまでのグラフを用いて処理時間の推移を考察する。

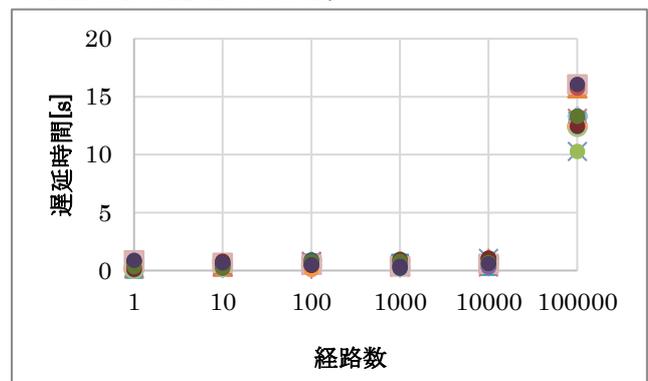


図 7 経路数による遅延時間の推移 (10 万まで)

経路数 1 万までの推移を図 8 に示した。経路数を増加させることにより遅延時間が大幅に増えるということは 1 万ルート以内であれば観測されなかった。平均値で見ると少しずつ増加しているが、1 秒以内の範囲で値がばらけているため、経路数の増加による遅延時間の変化はほとんどないと言える。

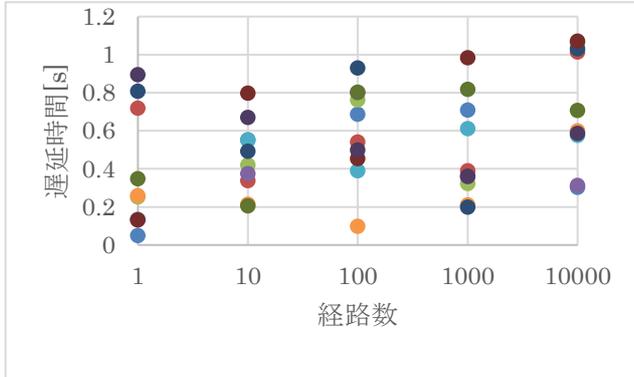


図 8 経路数による遅延時間の推移 (1 万まで)

次に、この遅延時間のうち占める割合の多い処理はなんであるか考察する。図 9 にメッセージ受信時間、経路計算時間、メッセージ送信時間を比較したものを示す。図 8 と同様に値はばらけているが、経路計算時間が遅延時間の大部分を占めていることがわかる。そのため、経路計算時間に対して、受信時間と送信時間は無視できるほど小さいことがわかった。

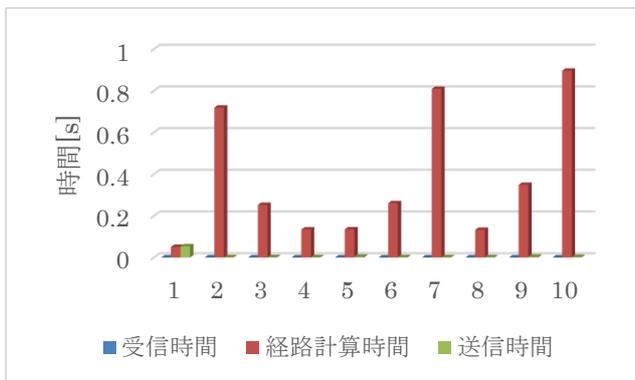


図 9 遅延時間の内訳

最後に 8.2 で紹介した日本全国の 1% のネットワークにてハンドオーバーによる経路更新がどれだけの時間で収束するか実験を行った。この実験ではモバイル端末が 30 万台つながっていることを前提としているため、あらかじめ BGP ルータに 30 万経路を広告している。また、ハンドオーバーが起こる際には 600 台の端末が隣接する基地局へ移動し、update メッセージが送信される仕組みとなっている。

このような構成にて行った実験結果を図 10 に示す。この図では経路更新が始まってから update メッセージが交換し終えるまでの時間を表している。縦軸はルータが最終的に受け取る全ルート数でその時点で受け取ったルート数を割っているため、縦軸が 1 となったとき、経路更新がすべて完了したことを表している。

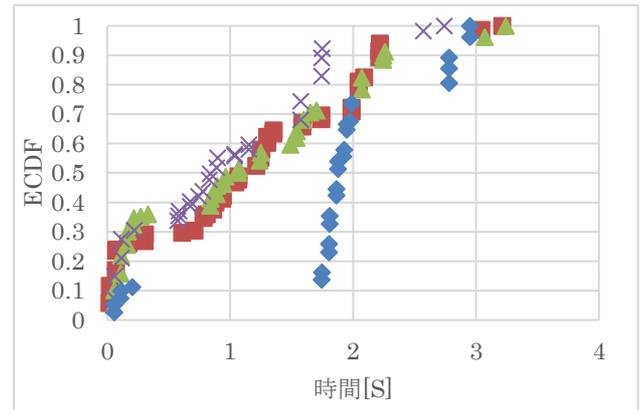


図 10 経路更新の収束時間

図 10 より、経路更新がおおよそ 3 秒で収束していることがわかる。ひし形のグラフでは一度更新が止まって急激に更新が進んでいる。このように経路が到着すると 10 万経路ほど膨大な経路数でなければ素早く更新できている。そのため、ある程度経路を溜めてから送るなど、update メッセージの送り方を工夫することでより遅延時間を少なくすることができるのではないかと考えられる。

10. おわりに

本研究は、Beyond 5G を見据えた次世代の携帯制御網を実現するためのアーキテクチャに関する検討を行っている。そのために、本研究では IP 網を基盤技術として規模性、冗長性、制御性を実現したアーキテクチャを提案した。その基盤の要素技術である、IP 網の経路制御に関して検討と実験に着手した。IP 網の広域経路制御に用いられている BGP を用いて、既存の 4G 網に適用した場合にどれだけ性能値を維持した上で通信ができるか確かめた。

その結果、遅延時間の面においてまだ現状の 4G 網の制御を完全に模倣することのできる環境とは言えないが、update メッセージやアーキテクチャを変更することでまだ改善の余地があると考えられる。

継続して BGP による規模性と性能値の検証を進めるとともに、以下の点について実験と検証を行う。

- BGP による無切断ハンドオーバーの可能性
- メッセージ量をおさえ経路を瞬時に伝搬させる BGP 網アーキテクチャ
- 今回の結果を基にしたエミュレーション環境の構築
- エミュレーションによる規模性と性能値の検証

本研究成果により、IP 網を基盤とした携帯網を構築するための基盤となる規模性と性能を確保することが可能となり、Beyond 5G に向けた基盤整備の一助となることが期待される。

謝辞

本実験にて使用した現在の 4G 網に関する規模性や性能値はソフトバンク株式会社より提供を受けた。記して感謝致します。

参考文献

- [1] Ruiyun Yu, Zhihong Bai, Leyou Yang, Pengfei Wang, Oguti Ann Move, Yonghe Liu, "A Location Cloaking Algorithm Based on Combinatorial Optimization for Location-Based Services in 5G Networks", *Access IEEE*, vol. 4, pp. 6515-6527, 2016.

-
- [2] Ming Tao, Jiaying Li, Jie Zhang, Xiaoyu Hong, Chao Qu, "Vehicular Data Cloud Platform with 5G Support: Architecture Services and Challenges", *Computational Science and Engineering (CSE) and Embedded and Ubiquitous Computing (EUC) 2017 IEEE International Conference on*, vol. 1, pp. 32-37, 2017.
- [3] Tarik Taleb, Konstantinos Samdanis, Badr Mada, Hannu Flinck, Sunny Dutta, Dario Sabella, "On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration", *Communications Surveys & Tutorials IEEE*, vol. 19, no. 3, pp. 1657-1681, 2017.
- [4] Y. Rekhter, T. Li and S. Hares, "A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)", *IETF RFC 4271*, Jan. 2006.
- [5] Mourad Khanfouci, "Distributed mobility management based on centrality for dense 5G networks", *Networks and Communications (EuCNC) 2017 European Conference on*, pp. 1-6, 2017.
- [6] F. Giust, L. Cominardi and C. J. Bernardos, "Distributed mobility management for future 5G networks: overview and analysis of existing approaches," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 1, pp. 142-149, January 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7010527.
- [7] Vassilios G. Vassilakis, Ioannis D. Moscholios, Bander A. Alzahrani, Michael D. Logothetis, "A software-defined architecture for next-generation cellular networks", *Communications (ICC) 2016 IEEE International Conference on*, pp. 1-6, 2016.
- [8] Haneul Ko, Insun Jang, Jaewook Lee, Sangheon Pack, Giwon Lee, "SDN-based distributed mobility management for 5G", *Consumer Electronics (ICCE) 2017 IEEE International Conference on*, pp. 116-117, 2017.
- [9] Tien-Thinh Nguyen, Christian Bonnet, Jérôme Harri, "SDN-based distributed mobility management for 5G networks", *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) 2016 IEEE*, pp. 1-7, 2016.
- [10] Yu-Jui Liu, Shin-Ming Cheng, Po-Yao Huang, "Cognitive vertical handover in heterogeneous networks", *Heterogeneous Networking for Quality Reliability Security and Robustness (QSHINE) 2015 11th International Conference on*, pp. 392-397, 2015.

† 東京大学 The University of Tokyo

‡ ソフトバンク株式会社 SoftBank Corp.