

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26280031

研究課題名(和文) 超大規模M2Mネットワークにおけるスケーラブルな経路制御に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Scalable Routing in Large Scale M2M Networks

研究代表者

長谷川 亨 (Hasegawa, Toru)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：70576264

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：数百万台のM2M デバイスを移動管理する経路制御方式を開発した。現状のデバイス宛毎に通信路を設定する方式では、移動状態の更新が膨大で数百万個のデバイスを管理できない。これに対して、以下の課題を解決して、第5世代携帯網向けの経路制御方式を開発した。第一に、デバイス毎への経路をブルームフィルタで実現することで、経路表が大きくなる課題を解決した。第二に、デバイスをアクセスルータに登録するアンカレス方式と組み合わせることで、デバイスへの通信パスを最短にした。第三に、D2D通信を用いて、移動したデバイスを発見する方式を設計し、組み合わせることで、経路制御方式を第5世代携帯網で動作可能とした。

研究成果の概要(英文)：This study develops a routing protocol for supporting mobility of tens of millions of M2M (Machine-to-Machine) devices in the mobile Internet, whereas current anchor based mobility management suffers from lack of scalability in the device number due to the fact that locations need be recorded for individual devices. The contributions of the study are summarized below: First, this study reduces sizes of routing tables, where individual device locations are recorded, by leveraging Bloom Filters. Second, the hop numbers to devices are minimized by integrating the routing protocol and anchorless management where device locations are recorded at edge routers. Finally, this study enables the routing protocol to be operated over 5G cellular networks by incorporating a discovery mechanism for devices which move to other cellular cells.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：移動管理 モバイルインターネット 携帯電話網 LTE ゲーム理論

1. 研究開始当初の背景

(1) モバイルインターネットの普及は著しく、センサなどマシン間の M2M (Machine-to-Machine) 通信が主流になり、2020 年には世界に設置された 1 兆個を超える M2M デバイスから収集した実世界データをビッグデータ解析し、現在は人手を要する様々な社会アプリケーションを自動化することが期待されていた。

(2) アンカーと呼ばれるノードに移動するデバイス毎に位置を登録するアンカー方式 (あるいはトンネル方式と呼ばれる) では、アンカーから移動するデバイス毎にトンネルと呼ぶ通信パスを設定する必要がある。このため、アンカーに移動するデバイス分の位置情報を蓄積する必要があり、数百万台規模の M2M デバイスの移動管理は困難であった。

(3) モバイルインターネットにおいて、アイドル状態のデバイスにデータを要求するパケットを転送するには、携帯網の全ての基地局から、アイドル状態のデバイスを発見する信号 (ページングと呼ばれる) をセル内の全てのデバイスに送信する必要があり、周波数資源を有効利用できないことが課題であった。

2. 研究の目的

(1) デバイスの位置情報を集中管理することで、ボトルネックとなるアンカーを不要とする分散的な移動管理を実現することを目的として、数百万台の M2M デバイスの移動管理を可能とする経路制御方式を開発する。

(2) モバイルインターネットを提供する代表的な無線アクセス網である第 4 世代、第 5 世代の携帯網において、開発した経路制御方式を動作可能とすることを目的として、携帯網のパケット転送方式とのインタワーク方式、ならびに携帯網での M2M デバイスの発見方式を開発する。

3. 研究の方法

(1) デバイスへの宛先を広報する経路情報を、ブルームフィルタを用いて圧縮 (すなわち、経路集約) することにより、100 万台のデバイス毎の宛先に対する経路情報を広報することを可能とする。さらに、携帯網や Internet Service Provider (ISP) 網で動作可能なように、Open Shortest Path First (OSPF) 等のリンク状態型の経路制御プロトコルを拡張して、ブルームフィルタを用いた経路制御方式を設計する。

(2) 設計した経路制御方式が第 4 世代、第 5 世代携帯網で動作できるように、携帯網のバックボーンの Evolved Packet Core (EPC) 網と経路制御方式をインタワークさせる方式を開発する。さらに、アイドル状態の M2M デバイスの発見に、無駄な周波数資源やデバイスのバッテリーを消費するページングを用いないように、使用する周波数資源の少ない D2D (Device-to-Device) 通信を用いたデバ

イス発見方式を設計する。

(3) 携帯インタフェースを持たず、Wi-Fi インタフェースだけを持つ M2M デバイスをサポートするには、Wi-Fi インタフェースを持つ他人の携帯端末が M2M デバイスのパケット転送することを前提としているため、携帯端末を協力させるインセンティブ機構を設計する。

4. 研究成果

(1) ディスタンスベクトル型の経路制御プロトコルに対して、経路情報をブルームフィルタを用いて集約する機能を追加した。複数のインタフェースから広報される経路情報の論理和を取ることで経路集約を可能とすることで、木構造のネットワークで動作可能な経路制御方式を設計した。50 万台の携帯端末が LTE ベースの携帯網に收容され、各携帯端末がレビーウォークモデルに従って移動する環境において、性能を評価した。この結果、50 万台の端末への宛先を約 73K バイトの経路情報に圧縮可能であり、このように経路情報を圧縮しても、宛先へのパケット配送率として 90% 以上を提供できることを明らかにした。

(2) ディスタンスベクトル型の経路制御プロトコルでは、経路情報を下流から上流へしか経路集約できなかったのに対して、リンクステート型の経路制御プロトコルに拡張することにより、任意の方向からの経路を集約できるように一般化した。具体的には、図 1 で示すように、OSPF の Link State Advertisement (LSA) でブルームフィルタを運べるように拡張した。この結果、任意のトポロジーのネットワークで設計した経路制御プロトコルを使用可能にした。また、ブルームフィルタを用いたパケットの宛先検索の汎用 PC 上での処理時間を測定し、1 秒間に 120 万パケット処理できることを検証した。

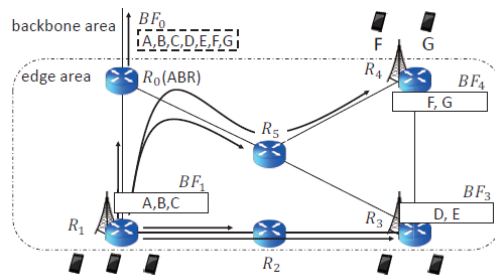


図 1 LSA を用いた経路情報の広報

(3) 経路制御プロトコルの弱点である新たな経路情報が定期的に広報されるまで、移動した M2M デバイスへのメッセージが配達されない問題を解決するアンカレス方式を設計し、経路制御プロトコルに組み合わせた。アンカレス方式は、M2M デバイスの移動前後のエッジルータ間にトンネルを設定し、移動した M2M デバイスへはトンネルを用いて配達する方式である。これにより、経路制御プロト

コルだけでは、約 90%であった配達率をほぼ 100%に向上させた。

(4) アンカレス方式では、いったんエッジデバイスを介して M2M デバイスと通信するため、エッジデバイスをバックボーン網に接続するバックホール回線にトラフィックが集中したり、通信パス長が延びる（パスストレッチと呼ばれる）ことが、課題となる。経路情報の交換数を増加させずに、これら課題を解決する交換間隔をシミュレーションを用いて導出した、ISP 規模のネットワークでは 30 秒程度の交換間隔を選択することで、図 2 示すように、パスストレッチを短縮する。同様に、トラフィックの集中を解消することを、シミュレーションを用いて検証した。

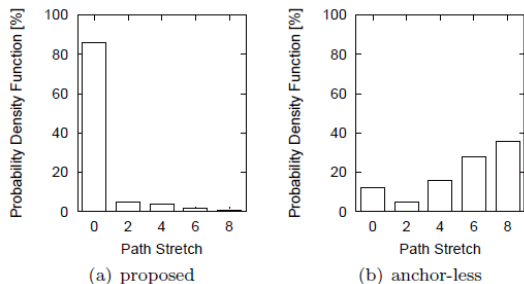


図 2 提案方式によるパスストレッチの短縮

(5) 設計した経路制御プロトコルを携帯網の packets コアである EPC 網で動作可能とするため、M2M デバイスのデータ通信チャネルの起動、停止を管理するシグナリングプロトコルを設計し、携帯網の基地局に実装する手法を設計した。設計したシグナリングプロトコルでは、停止中の携帯端末の起動に必要な、携帯網全体への探索メッセージの送信（ページングと呼ばれる）回数を削減している。

また、携帯で測定した無線品質やスループットを測定した測定値をシミュレーションソフトウェアに導入することで、現実的な携帯電話網におけるシミュレーション評価を可能とした。

(6) 携帯インタフェースを持たない M2M デバイスが携帯網を介して通信できるように、Wi-Fi インタフェースを持つ携帯端末が M2M デバイスのゲートウェイ（モバイルゲートウェイ）として、携帯網に収容する方式を図 3 のプロトコルスタックとして設計した。

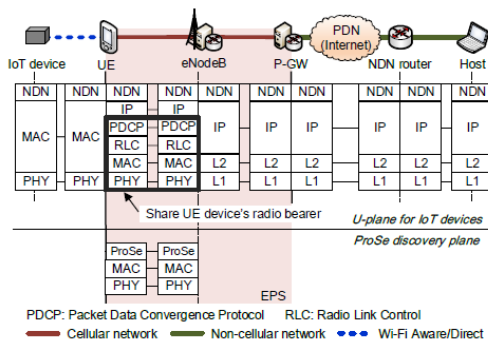


図 3 モバイルゲートウェイのプロトコルスタック

携帯端末が第 3 者の設置した M2M デバイスのモバイルゲートウェイとしてパケットを代理転送することを促す、インセンティブ機構を設計し、本機構が有効であることを、ゲーム理論を用いて証明した。本インセンティブ機構では、通信事業者が、携帯端末に対して、M2M デバイスのために転送したメッセージ量に応じた報酬を与えることで協力させる。携帯端末と通信事業者の振る舞いを、2 ステージの順序ゲームとして定式化することで、このゲームが均衡点に収束すること、すなわち、十分な数の携帯端末の協力が得られることを証明した。

(7) モバイルゲートウェイでは、携帯端末がアイドル状態になっている時、基地局から M2M デバイスと接続される携帯デバイスを発見する必要がある。携帯網が提供するページング機構を用いた場合、ページングのメッセージ数が多くなり、無駄なメッセージにより、携帯の周波数資源と、携帯端末のバッテリーの電力を無駄に消費する。この課題をかいけつするため、ProSe などの携帯網が提供する D2D 機能を利用してモバイルゲートウェイを発見する方式を設計した。

1 つのセルに 5 万台の M2M デバイスが設置された高密度な環境を想定してシミュレーションを行い、既存の携帯網のページング機構と比較して、M2M デバイスを発見するための通信オーバーヘッド（制御メッセージ数）を削減できることを明らかにした。さらに、D2D 通信の電波強度を推定し、推定結果を用いてシミュレーションで評価した結果、提案したデバイス発見方式が 500m から 1km の広域のセルにおいて実用的であること、図 4 に示すようにセル内の携帯端末が約 1000 台以上であれば、M2M デバイスに対して高い確率でパケットを配達できることを明らかにした。

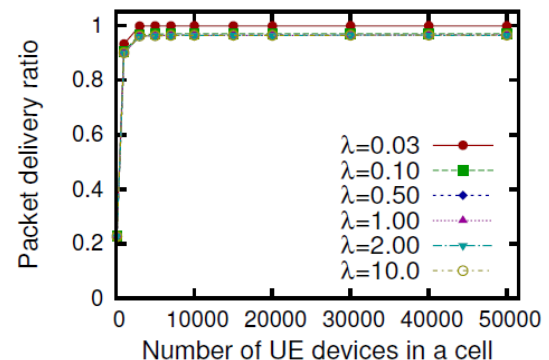


図 4 M2M デバイスへのパケット配達率

5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計 2 件)
 ① 石野正典, 小泉佑揮, 長谷川亨, A Routing-Based Mobility Management Scheme for IoT Devices in Wireless Mobile

Networks, IEICE Transactions on Communications, Vol. E98-B, No.12, pp. 2376-2381, 2015.

② 西山陽央, 小泉佑揮, 長谷川亨, 杉山浩平, 田上敦士, Routing-Based Mobility Architecture for Future 5G Cellular Networks, IEICE Transactions on Communications, Vol. E100-B, No. 10, 2017.

〔学会発表〕（計 18 件）

① 西山陽央, 石野正典, 小泉佑揮, 長谷川亨, 杉山浩平, 田上敦士, A Proposal on Routing-Based Mobility Architecture for ICN-based Cellular Networks, In Proceeding of The third Workshop on Name-Oriented Mobility: Architecture, Algorithms and Applications, April 2016.

② 石野正典, 小泉佑揮, 長谷川亨, Leveraging Proximity Services for Device Discovery in User-provided IoT networks, In Proceeding of 2nd IEEE World Forum of Internet of Things, December 2015.

③ 真中雄二, 長谷川慶太, 小泉佑揮, 長谷川亨, On Live Migration and Routing for Delay Sensitive Cloud Services in Wireless Mesh Networks, In Proceeding of IEEE ICC 2015, June 2015.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 亨 (Toru Hasegawa)

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：7056264

(2) 研究分担者

津川 翔 (Sho Tsugawa)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：40632732

小泉 佑揮 (Yuki Koizumi)

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：50552072

(4) 研究協力者

田上 敦士 (Atsushi Tagami)

KDDI 総合研究所・グループリーダー