

令和元年5月24日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06338

研究課題名(和文) 超多端環境に適した多次元グラフ構造に基づく新たな媒体アクセス制御技術の研究

研究課題名(英文) Medium Access Control Techniques based on Multi-Dimensional Graph Structures for Massive Connectivity

研究代表者

石橋 功至 (Ishibashi, Koji)

電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター・准教授

研究者番号：80452176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：全てのモノをインターネットに接続し、人間生活をサポートするIoTの実現が期待されている。IoTの普及に伴い、数十億を超える超多数のデバイスが同一の無線資源を用いて通信を行うことが想定される。本研究課題では、超多数の端末を低遅延で安定して接続可能とする新しい通信方式と、その理論の構築を目的とした。そこで逐次干渉除去技術をベースとし、複数基地局が連携する新たな方式を提案し、基地局数の増加に応じた性能利得が獲得できることを明らかにした。またパケット衝突を積極的に利用することで、通信効率をさらに向上可能な手法を提案した。これらの成果は、将来の通信技術の基盤として活用が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

総務省の統計によれば日本の人口は2011年以降、継続して減少傾向にある。人口の減少に伴う少子高齢化によって、労働人口そのものが減少する中でどのように社会インフラ・公共サービスを維持するかは、もはや逃れることのできない喫緊の課題である。この問題に対して、全ての機器に無線通信機能を付与し、相互的かつ即応的な通信・制御を可能とするIoT技術の実現は急務である。本研究の成果は従来の無線通信技術では実現不可能な数十億という超多数のデバイスを安定的かつ低遅延で接続する技術の基盤となるものであり、将来の無線システム、ひいては社会を支える重要な技術である。

研究成果の概要(英文)：In this project, we proposed efficient medium access control protocols which support massive number of wireless devices for IoT era. Specifically, we proposed a random access scheme where multiple base stations cooperatively retrieve packets by sharing retrieved packets, and revealed that the performance gain monotonically increases with the number of base stations. Moreover, we proposed one exploiting ZigZag decoding, in which two collided packets can be resolved, so that ZigZag decoding exploits collision of packets to enhance the throughput performance. These proposed schemes will be enablers to realize IoT era with massive devices.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：モノのインターネット 多元接続方式 二部グラフ ランダムアクセス スロット化ALOHA IoT ジグザグ復号 基地局連携

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

モノのインターネット（IoT: Internet of Things）の普及に伴い、数十億を超える超多数の端末が同一の無線資源を用いて通信を行うことが想定される。このような状況においては、各端末が自律的に通信を行うランダムアクセス方式を用いることで、超多数端末が効率的に通信を行うことが可能となる。特に、非常に高いスループットを達成するランダムアクセス方式として、ALOHA に逐次干渉除去（SIC: Successive Interference Cancellation）を適用した符号化 ALOHA が知られている。符号化 ALOHA では、各端末は事前に設けられたフレームと呼ばれる複数の時間スロットにおいて、自身のパケットを複数スロットに渡って再送する。受信機は SIC を用いて、衝突を含む受信パケットから、送信されたパケットを復元する。各端末の再送回数を理論的に最適化することで、TDMA のような無線資源を各ユーザに排他的に割り当てる手法に比肩する高いスループットを達成できる一方、事前に受信機が適切なフレーム長を選択する必要があり、ユーザ数に対して適切なフレーム長が選択されなかった場合、スループットの低下につながるという問題がある。IoT では、端末の通信はイベントドリブンで行われ、パケットを送信する端末の数は通信の度に動的に変化すると考えられる。したがって、フレーム構造に基づく従来の符号化 ALOHA 方式で高いスループットを達成するためには、適切なフレーム長を通信のたびに設計する必要があり、フレーム長選択に時間資源が消費されることで通信効率の劣化に繋がる。以上より、超多数の端末が散発的に起動する環境においても安定して高い通信効率を達成可能な媒体アクセス制御方式の研究開発が急務であった。

2. 研究の目的

本研究課題では、超多数端末環境をサポート可能な新たな媒体アクセス制御の提案を目的とする。具体的には、超多数端末環境下において、従来のランダムアクセス方式よりも高い通信効率、高い通信信頼性を有するランダムアクセス方式を提案し、IoT に代表される次世代大規模無線通信環境の実現可能性を示すことを目標とする。

3. 研究の方法

前章で述べた目的の達成のために、本研究課題では研究代表者が得意とするグラフに基づく符号のアプローチを利用し、これを通信に応用したフレームレス ALOHA と呼ばれる符号化 ALOHA 方式に着目した。フレームレス ALOHA をグラフ構造によって理解し、さらにそれを改良する手法として、大別して以下の 2 つのワークパッケージで研究を実施した。(1) 複数の基地局が存在する環境を想定し、複数基地局が協調して SIC を行うことで効率的にパケットを復元する手法を提案する。通信効率最大化のためのパラメータ設計においては、任意の台数の基地局が存在する環境に対して特性を解析する手法を提案し、本手法の理論的な性能限界を明らかにする。(2) 加えて、各基地局におけるパケット復元効率の向上を目指し、到来信号の物理的現象に着目し、これを活用したジグザグ復号と呼ばれるパケット復元手法をフレームレス ALOHA に適用した手法を提案する。

4. 研究成果

(1) 複数基地局協調を用いた効率的なパケット復元手法

複数の基地局（BS: Base Station）が SIC を行い、復元に成功したパケットを他の BS に共有することで効率的にパケットの復元を行う、複数 BS 協調を用いた符号化 ALOHA が提案されている。しかし、従来方式では送信を行うユーザ数に対して適切なフレーム長を事前に設定する必要があり、フレーム長の不適切な選択は通信効率および通信信頼性の低下につながるという問題があった。更に、複数 BS 協調を用いた SIC のパケット復元特性はこれまでに近似解析のみが与えられており、パケット復元特性、通信効率特性の厳密な理論解析は導出されていなかった。以上より、パッケージ (1) では、超多数の端末が存在し、かつ通信トラフィックが変化する場合でも安定して高い通信効率を達成可能な手法を提案し、通信効率の厳密な理論解析を導出した。

複数 BS 協調を用いたフレームレス ALOHA では、送信を行うユーザを、接続可能な BS 毎に複数のグループに分類し、各グループに異なる送信確率を設定する。ユーザは与えられた送信確率に基づき、各時間スロット毎にパケットを送信するかを決定する。BS はまず自身がそれまでに受信したパケットに対して SIC を行い、パケットを復元する。その後、各 BS は復元に成功したパケットを他の BS へ共有する。ただし、パケットの共有は BS 間のバックホールネットワークを用いて実現される。各 BS は、共有されたパケットを受信信号から減算することで衝突を除去し、更に新たなパケットを復元する。以上の操作を十分数のパケットが復元されるまで繰り返す。

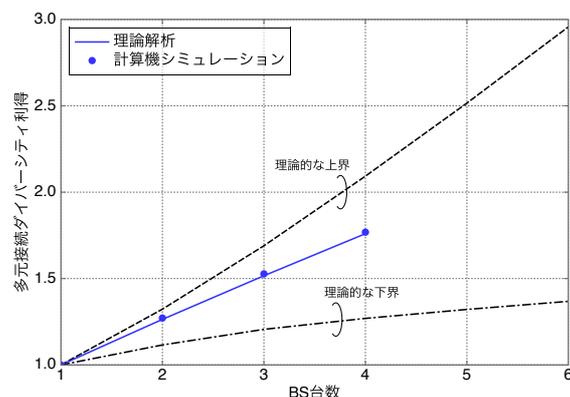


図 1 多元接続ダイバーシティ利得

まず、3 台の基地局が存在する環境下での複数 BS 協調を用いたフレームレス ALOHA の通信効率を評価した。評価指標としてスループットを用い、本研究課題では単位時間スロットあたりに復元されたパケット数として定義した。計算機シミュレーションから、BS 間でのパケット共有によって連鎖的にパケットを復元し、通信効率を向上できることを確認した。我々はこの連鎖的なパケット復元によって得られる利得を多元接続ダイバーシティ利得と名付け、通信効率の解析を BS 台数に対して一般化することで、この利得が BS 台数に対してどう変化するかを評価した。図 1 に BS 台数に対する多元接続ダイバーシティ利得を示す。利得の厳密解析は BS 台数に対して指数的な演算量を要するため、大きな BS 台数に対しては利得に対する上界と下界を評価した。同図より、BS 台数が増加するにつれて、多元接続ダイバーシティ利得が単調に増加することが明らかとなった。本パッケージで提案した方式は複数 BS 協調の導入による顕著な性能改善を示唆しており、国際的に見てもインパクトの大きい研究成果であると言える。

(2) ジグザグ復号の活用によるパケット復元効率の向上

ワークパッケージ (1) では、従来の符号化 ALOHA における BS でのパケット復元処理を大きく変えることなく、BS 間協調の導入によって達成される性能利得を明らかにした。本パッケージでは、従来の SICに加え、各 BS がジグザグ復号と呼ばれるパケット復元手法を導入することでさらなるパケット復元効率の向上、通信信頼性の向上を実現した。

ジグザグ復号は、衝突したパケットの受信タイミングのズレを利用して衝突を分解する技術である。2つのパケットが衝突したとき、これらのパケットの受信タイミングが異なっていれば、各パケットの先頭部分と末尾部分は衝突なく受信される。このとき BS は送信したユーザへ再送を要求し、衝突を含むパケットを 2つ得る。2つのパケット内のそれぞれで受信タイミングが異なっていた場合、衝突なく受信された部分からパケットを逐次的に復元していくことで衝突していた 2つのパケットを復元することが可能となる。

本パッケージでは、このジグザグ復号のフレームレス ALOHA への適用を検討した。まず、BS が 2つのパケットの衝突を検知可能であるという仮定の下、2 台のユーザが衝突した際に BS がパケットの再送を要求することで、フレームレス ALOHA へジグザグ復号を導入した。この手法をジグザグ復号可能なフレームレス ALOHA (ZDFA: ZigZag Decodable Frameless ALOHA) と名付け、その通信効率を評価した。しかし、ZDFA の通信効率は通常のフレームレス ALOHA よりも劣化することが計算機シミュレーションから明らかになった。これは、衝突したパケットの再送のために時間スロットが占有され、その間他のユーザが送信を控えなければならず、通常のフレームレス ALOHA よりもユーザの送信機会が減少してしまうことに起因する。この問題を解決するため、パケットの復元状況に併せて送信確率を適応的に増加させる手法を提案した。具体的には、BS はパケットが受信されてすぐに復元された場合にこれをフィードバック信号で報知し、各ユーザはフィードバック信号を観測することで他ユーザのパケットが復元されたことを把握し、送信確率を増加させる。この手法を拡張 ZDFA (E-ZDFA: Enhanced ZDFA) と名付け、通信効率及びパケット復元失敗確率 (PLR: Packet Loss Rate) の観点から評価した。

通信効率の観点では、適切な送信確率を設定することで、従来のフレームレス ALOHA のスループットが約 0.368 であったのに対し、E-ZDFA は約 0.929 というスループットを達成し、従来のフレームレス ALOHA よりも約 7%高いスループットを達成できることが明らかになった。これは、ZDFA において問題となっていた送信機会の減少を抑圧することに成功したことによるものである。また、フレームレス ALOHA、ZDFA、および E-ZDFA の PLR 特性を図 2 に示す。同図より、ZDFA はフレームレス ALOHA と比較してユーザの送信機会が減少してしまうために時間スロットが増加しても PLR が高いことが確認できる。一方、E-ZDFA は送信確率を増加させることで送信機会の減少を抑圧し、フレームレス ALOHA および ZDFA よりも低い PLR を達成しており、より多くのパケットの復元に成功していることが明らかとなった。また、各手法の PLR 特性には、時間スロット数が大きくなるにつれ、PLR の改善が緩やかになる領域 (エラーフロア) が存在することが確認できる。本パッケージでは、E-ZDFA の送信確率の更新を理論的に解析することでエラーフロアを導出した。得られたエラーフロア解析は計算機シミュレーションの結果と概ね一致しており、時間スロット数が大きい状況下での E-ZDFA の PLR 特性に対して良い近似を与えている。エラーフロア解析の導出により、E-ZDFA の PLR を計算機シミュレーションを行うことなく従来手法の PLR 特性と比較することが可能となり、パラメータ設計に活用できると考えられる。本パッケージで提案した方式はこれまでに提案されていない方式であり、計算機シミュレーションのみならず理論解析をも導出したことは国際的にも特筆すべき貢献であるといえる。

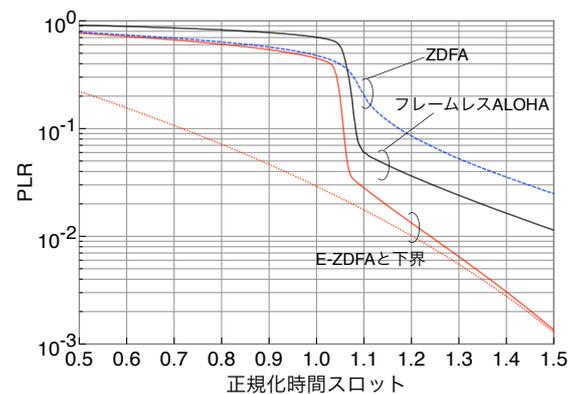


図 2 E-ZDFA の PLR 特性

以上の 2 つのパッケージに示される本研究課題の結果を組み合わせることで、超多数の端末が存在する次世代無線通信環境をサポート可能な媒体アクセス制御方式の実現が可能であると考えられる。しかしながら、本研究課題の結果は計算機シミュレーション及び理論解析に基づく机上研究の成果であり、実用化に向けては、特に SIC の実現について課題が山積しており、さらなる研究、検討が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

- ① Shun Ogata and Koji Ishibashi, Application of ZigZag decoding in Frameless ALOHA, IEEE Access, 査読有, 7 巻, 2019, pp. 39528-39538
DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2906937
- ② Shun Ogata, Koji Ishibashi, Giuseppe T. F. de Abreu, Optimized Frameless ALOHA for Cooperative Base Stations With Overlapped Coverage Areas, IEEE Transactions on Wireless Communications, 査読有, 17 巻, 2018, pp. 7486-7499
DOI: 10.1109/TWC.2018.2867492

〔学会発表〕 (計 12 件)

- ① Shun Ogata and Koji Ishibashi, ZigZag Decodable Frameless ALOHA, 2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, 2018
- ② Shun Ogata and Koji Ishibashi, Coded Frameless ALOHA, 2018 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications, 2018
- ③ Masaru Oinaga, Shun Ogata, and Koji Ishibashi, ZigZag Decodable Coded Slotted ALOHA, 2018 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications, 2018
- ④ Shun Ogata and Koji Ishibashi, Received-Power-Aware Design of Transmission Probability for Frameless ALOHA, SmartCom 2017, 2017
- ⑤ Shun Ogata, Koji Ishibashi, and Giuseppe Abreu, Multi-Access Diversity Gain via Multiple Base Station Cooperation in Frameless ALOHA, 18th IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2018
- ⑥ 尾形駿、石橋功至、ZigZag 復号を適用したフレームレス ALOHA のパケット損失確率特性、第 41 回情報理論とその応用シンポジウム、2018
- ⑦ 追永大、尾形駿、石橋功至、ZigZag 復号可能な符号化スロット化 ALOHA、電子情報通信学会無線通信システム研究会、2018
- ⑧ 尾形駿、石橋功至、フレームレス ALOHA のための距離を考慮した送信確率設計、第 40 回情報理論とその応用シンポジウム、2017
- ⑨ 尾形駿、石橋功至、アブレウジュゼッペ、複数ベースステーション協調を用いたフレームレス ALOHA におけるパケット損失確率の一般化解析について、電子情報通信学会無線通信システム研究会、2017
- ⑩ 尾形駿、石橋功至、フレームレス ALOHA における効率的なパケット復調法に関する一検討、電子情報通信学会無線通信システム研究会、2017
- ⑪ 尾形駿、石橋功至、符号化フレームレス ALOHA におけるターゲット次数及び符号次数分布の同時最適化、第 39 回情報理論とその応用シンポジウム、2016
- ⑫ 尾形駿、石橋功至、符号化フレームレス ALOHA の次数分布最適化、電子情報通信学会無線通信システム研究会、2016

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：アブレウ ジュゼッペ

ローマ字氏名：Giuseppe Abreu

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。