

IoT 化が与える無線アクセストラフィック特性の調査

曲渕伊織¹ 田村瞳¹ 塚本和也²

概要： Internet of Things (IoT)のアクセスネットワークとしては主に無線 Local Area Network (LAN) が利用されている。先行研究において、従来の YouTube 等のリッチコンテンツと、新たに IoT デバイスが発生するトラフィックが無線 LAN 上に混在すると、Quality of Experience (QoE)維持が困難になる可能性が示唆されている。よって、それぞれのアプリケーションに適応したトラフィック制御技術が必要となるが、現状では IoT デバイスが送受信するパケットの特徴(発生頻度やパケットサイズ)がリッチコンテンツとどの程度異なるか検証されていない。そこで本研究では、様々な IoT データとリッチコンテンツの無線 LAN 上でのトラフィック特性の差異を明らかにし、機械学習による分類や推定の実現可能性を議論する。

キーワード： 無線 LAN, トラフィック制御・解析, 機械学習・データマイニング

Investigation of Application Traffic Characteristics on WLAN in the IoT era

IORI MAGARIFUCHI¹ HITOMI TAMURA¹
KAZUYA TSUKAMOTO²

Abstract: Wireless Local Area Networks (LANs) are mainly used as an access network for the Internet of Things (IoT) era. Prior research has suggested that the coexistence of data with different traffic characteristics arising from traditional rich content and the newly IoT applications on a wireless LAN may bring us the degradation of QoE (Quality of Experience). Therefore, the detailed traffic control techniques that can be adapted to diverse application are necessary, but none of existing studies has clarified how the traffic characteristics such as packet size and its intervals are different between the conventional rich contents and the IoT applications. In this study, we focus on the differences in traffic characteristics from among various IoT applications and rich contents on the WLAN, and then discuss the feasibility of machine learning classification and estimation based on the analysis results.

Keywords: Wireless LAN, Traffic control, and analysis, Machine Learning and Data Mining

1. 研究背景と目的

1.1 IoT とは

IoT とは Internet of Things の略で、様々なモノがインターネットに接続され、データをやりとりする状態のことを指す[1]。IoT によって遠隔でのモノの状態の監視、離れたモノの操作を行うことが可能になる。こういった IoT デバイスの数は年々増加傾向にあり、2023 年には 340 億台にのぼると予想されている。スマートフォンやパソコンなどは市場が飽和状態であるが、家電などの消費者製品や工場の製造ラインなどの産業用途で使われる IoT デバイスは今後大きな増加が見込まれる[2]。

1.2 IoT の通信方式

図 1 は IoT の通信方式である。IoT の通信は大きく分けて直接通信方式とデバイスゲートウェイ方式がある。直接通信方式は IoT デバイスそのものが直接インターネットに接続する方式で、4G や 5G 通信網を利用するため、通信範

囲が広い反面、通信費と消費電力が高いという特徴がある。もう一つのデバイスゲートウェイ方式では IoT デバイスに必要な最低限の機能のみを搭載し、ゲートウェイを介してインターネットに接続する方式で、無線 LAN や Bluetooth を使うため、消費電力が少ないという特徴がある[3]。現在はコスト面からデバイスゲートウェイ方式のものが多いため、インターネットへのアクセスネットワークとして無線 LAN が一般的に利用されている。

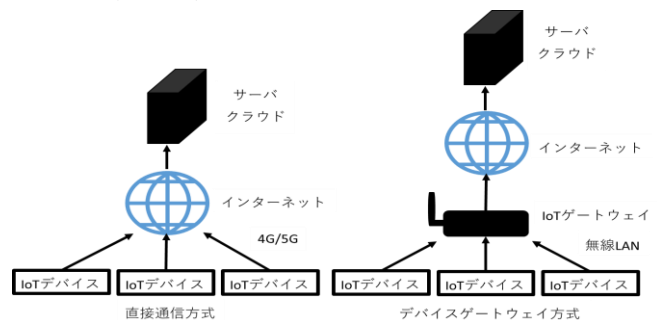


図 1 IoT の通信方式

1 福岡工業大学大学院 工学研究科 電子情報工学専攻
Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology.
2 九州工業大学大学院 情報工学研究院
Faculty of Computer Science and System Engineering, Kyushu Institute of

1.3 無線 LAN の概要

1.3.1 無線 LAN の進化

1997年に国際標準規格としてIEEE802.11が策定された。その後、スマートフォンやタブレット端末などの普及とともに、音声や動画のようなリッチコンテンツが増加したことで無線LANの高速化が求められた。それによって様々な機能が実装され、現在は2021年に策定された最新の規格であるIEEE802.11axでは、高速化技術としてOrthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)とOrthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)を採用している。このOFDMとOFDMAは1.3.2節と1.3.3節で説明する。

1.3.2 OFDM

OFDMとは多数の搬送波(サブキャリア)を使用し、それぞれを異なるデータでデジタル変調することによって並列伝送を行う変調方式である[4]。図2(a)にOFDMでの帯域使用例を示す。OFDMは1つの端末毎に全ての周波数帯域を割り当てるため、1台の端末が通信を行っている間は他の端末は通信を行うことができない。そのため、OFDMではアクセスポイントに接続する端末が増えるほどCSMA/CAによる待ち時間が増大するが通信端末はOFDMで使用する全帯域を用いて通信する。

1.3.3 OFDMA

OFDMAはIEEE802.11axで導入された技術であり、OFDMを改良して周波数帯域内のサブキャリアを束ねたRU(Resource Unit)と呼ばれる単位に分割することで複数端末の同時通信を可能とした技術である。具体的には、20MHzの帯域幅を256サブキャリアに分け、そのサブキャリアをグループ化したものをRUとして用いる[5]。また、RUの数はサブキャリアの数や帯域幅によって変わり、20MHzの場合、最大で9端末との同時通信が可能となる。図2(b)にOFDMAでの帯域使用例を示す。OFDMAでは各端末にRUを割り当てることで同時通信するため、アクセスポイントに接続する端末が増えた場合でもOFDMよりもCSMA/CAによる待ち時間を減少することができる。しかし、RUの割り当てによって1端末あたりが使用可能な帯域が、OFDMと比較して狭帯域となる。

1.4 無線LANにおけるIoTトラフィックの問題点

1.1節や1.3.1節で述べたように、今後増えていくであろうIoTデバイスが無線LANに接続されることで、従来のリッチコンテンツからのトラフィックとIoTデバイスからのトラフィックが無線LAN上に混在することになる。このとき、OFDMではデータの大きさに関係なく全ての周波数帯域を占有するため、小さな packet サイズが混在しやすい通信環境下では非効率となる可能性がある。一方、OFDMAでは周波数帯域を複数端末に同時に分割して割り当てるため、1端末が使える周波数帯域はOFDMと比較して減少する。そのため、リッチコンテンツのように packet サイズが

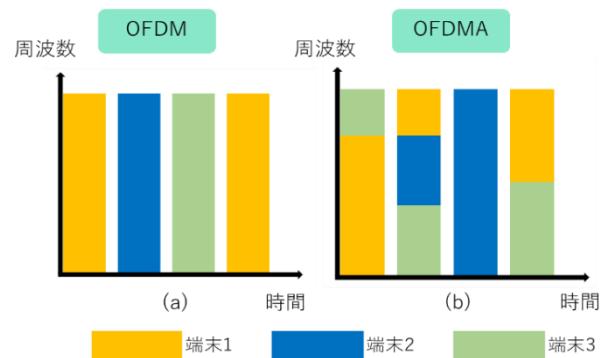


図2 OFDMとOFDMA

大きく高レートの通信では、OFDMよりも送信時間が増加することが考えられる。実際、packetサイズが大きく、高レートの通信では接続端末数が4台以上の時、OFDMの方がOFDMAよりも良好なスループットを示し、packetサイズが小さく、低レートの通信ではOFDMAで安定的なスループット特性となることが先行研究によって明らかになっている[6]。そのため、無線LANにおいて、スループット向上を目的に大きなpacketサイズが採用されていると予想される従来のリッチコンテンツに加えて、今後増加することが予想されるIoTトラフィックそれぞれに適応したトラフィック制御技術が必要である。しかし、現状では無線LANにおけるIoTトラフィックの特性に関する調査は不十分である。

無線LANにおけるトラフィック特性の調査としては、IEEE802.11n準拠の無線LANにおける消費電力技術の検討のために、YouTubeやFacebookなどのコンテンツを利用した場合のpacketサイズやプロトコル分布が調査されているが[7]、最新規格であるIEEE802.11ax無線LANを対象とした調査や、IoTデバイスが増加した現在のネットワーク環境での調査は行われていないのが現状である。

そこで本研究では、IEEE802.11ax準拠の無線LANに収容される様々なIoTデバイスからのトラフィックに加え、YouTubeなどのリッチコンテンツのトラフィック特性を調査し、トラフィック特性の差異について議論する。さらに、リッチコンテンツによるトラフィックとIoTトラフィックを同時に処理可能な無線LANトラフィック制御技術を今後考案するために、トラフィック特性の分析結果、それに基づく機械学習を活用したトラフィック分類や推定の実現可能性について議論する。

2. トラフィック特性の調査実験

2.1 実験方法

実験ではリッチコンテンツのトラフィックとIoTデバイスからのトラフィックの違いを明らかにするため、どちらも動画トラフィックを対象とした。まず、従来のリッチコンテンツのトラフィックとしてスマートフォンでYouTubeを視聴する際のトラフィック特性を調査した。デバイスとしては、

Google Pixel 6a を利用し、YouTube の(1)3 分の動画、(2) 20 分の動画の 2 種類のトラフィックをキャプチャした。加えて、動画とは異なる通信特性を持つリッチコンテンツとの差異も調査するために、現在でも利用数・量が多い WWW による web 閲覧を対象とし、(3)ブラウザを利用した Yahoo ニュース検索時の 12 秒間のテキストデータのトラフィックをキャプチャした。

一方で、IoT デバイスとしては SwitchBot の見守りカメラを使用した。見守りカメラを実際に日常で使用することを想定し、以下の 3 つのパターンの動作時を対象としたトラフィックをキャプチャして分析した：(4)見守りカメラを電源に接続するのみでスマートフォンからは 1 分間何も操作しない、(5)スマートフォンで見守りカメラを 32 秒操作した、(6) スマートフォンで操作を行わず動体検知機能のみを 44 秒間動作させた。

図 3 に実験で用いたネットワークの構成を示す。実験手順としてはまず IEEE802.11ax 準拠のアクセスポイントに上記の Google Pixel 6a と SwitchBot の見守りカメラを接続する。アクセスポイントの上流に、有線 LAN 接続の packets キャプチャ用 PC をブリッジ接続し、当該 PC のさらに上流で研究室のルータを経由してインターネットに接続させる。このとき、アクセスポイントと有線接続している packets キャプチャ用 Linux PC において tcpdump を実行し、当該 PC の有線 LAN インターフェースを経由してインターネットと各デバイスが通信の様子を packets キャプチャした。今回の実験では、IEEE802.11n 無線 LAN におけるトラフィック特性の調査結果と比較できることから文献[7]を参考にし、上記(1)~(6)の通信時の packets サイズ、packets 到着時間間隔、プロトコルの種類について度数分布を作成し、評価を行った。これらの結果から、リッチコンテンツのトラフィックと IoT トラフィックで packets サイズに違いがあるのか、packets の発生頻度はどのくらいなのか、使われているプロトコルに違いがあるのかを調べる。

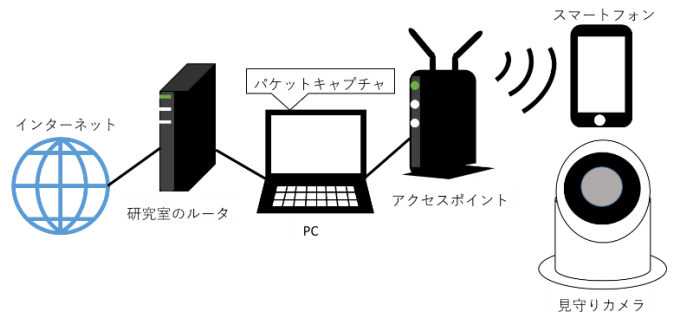


図 3 実験で用いたネットワークの構成

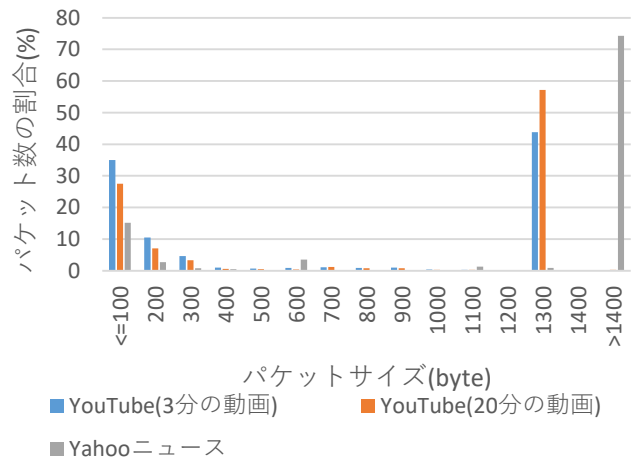


図 4 リッチコンテンツのトラフィックの packets サイズ

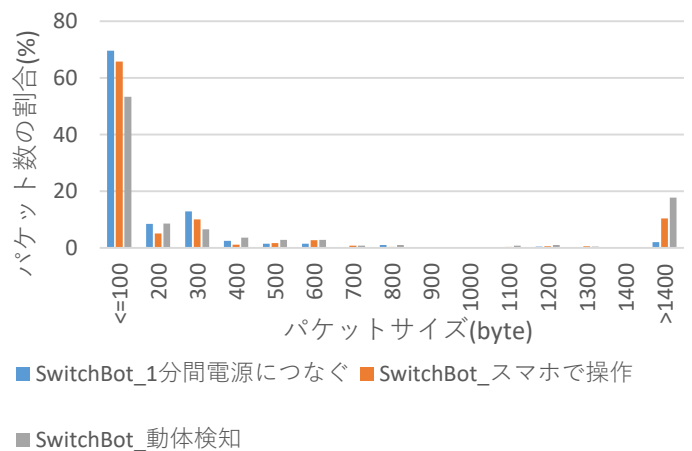


図 5 IoT トラフィックの packets サイズ

全 packets に占める割合はいずれも 50%以上となっていた。ただし、生成 packets 数は(4)が 201 個、(5)が 1092 個、(6)が 500 個となっていることから従来から利用されている Web アプリケーションや YouTube とは packets サイズも packets 数の両面で特性が異なることがわかった。

2.2.2 packets 到着時間間隔

図 6, 7 に packets キャプチャの結果を基に作成した、アプリケーション利用時の隣り合う 2 packets の到着時間間隔とその発生頻度を示す。図より、YouTube と Yahoo ニュ

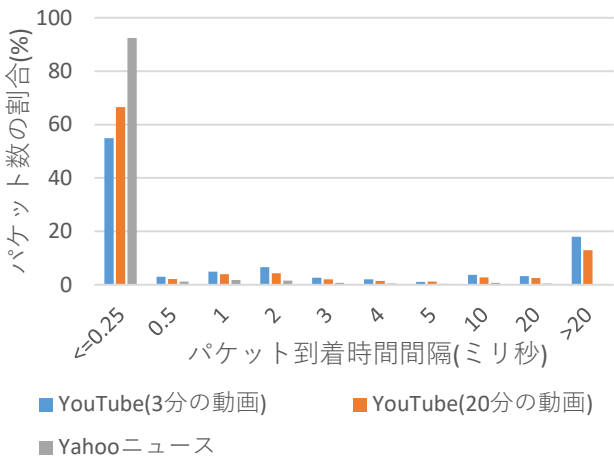


図 6 リッチコンテンツの packets 到着時間間隔

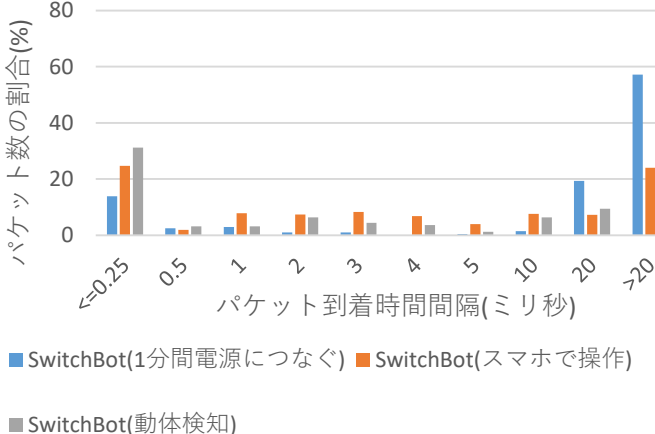


図 7 IoT トラフィックの packets 到着時間間隔

一の packets 到着時間間隔は 0.25 ミリ秒以下のものが一番多く、全体の 50%以上を占めていた、また、YouTube の 20 分の動画では packets 到着時間間隔が 20 ミリ秒以上の packets も全体の約 15%程度と少なくなっていることがわかった。リッチコンテンツでは、ユーザからの通信要求があると即座に(動画の場合、通信開始直後のバッファリング後に)多くの packets を一気に送信しようとするため、大半の packets が packets 到着間隔 0.25 ミリ秒以下で到着していると予想される。

次に、SwitchBot の見守りカメラでは packets 到着時間間隔が 20 ミリ秒以上である頻度が YouTube、Yahoo ニュースに比べて多く、動体検知時以外はすべて最頻値を示していた。一方で、(5)スマートフォンで操作する場合や(6)動体検知を行う場合は、オンデマンド制御によるバーストトラフィックが操作時、及び定期的な動作時に発生するため、0.25 ミリ秒以下の packets 到着時間間隔がある程度発生することがわかった。

このことからリッチコンテンツのトラフィックは packets 到着時間間隔が短いものが大半を占めている一方で、IoT トラフィックは制御挙動に応じてバースト的に発生するものと散発的に発生するものが混在することがわかった。

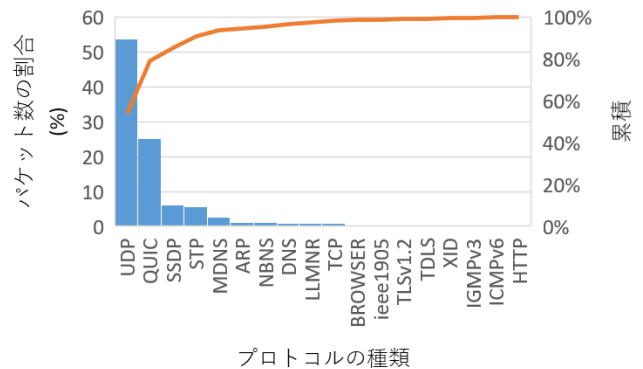


図 8 YouTube の 3 分の動画視聴の protocols の種類

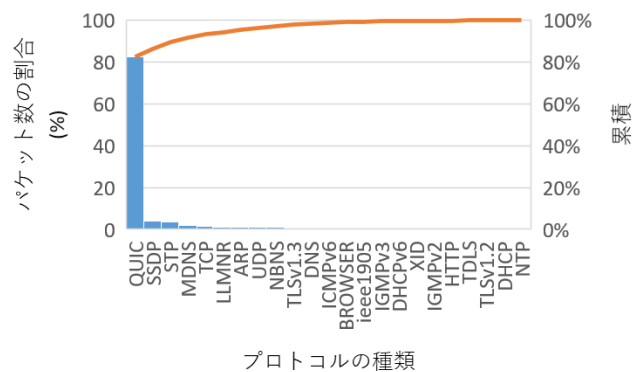


図 9 YouTube の 20 分の動画視聴の protocols の種類

2.2.3 packets の protocols の種類

図 8~13 に(1)~(6)で発生した packets の protocols の種類と、対応する packets 数の割合、その累積分布を示す。YouTube の 3 分の動画と 20 分の動画はともに UDP もしくは QUIC が最も多く、Yahoo ニュースでは TCP が主に使用されていた。また、頻度上位 4 位までの protocols の packets が 90%以上を占めていることがわかった。

一方、SwitchBot の見守りカメラでは(5)スマートフォンでの操作時と(6)動体検知時は TCP が主に使用されていたが、(4)見守りカメラを 1 分間電源につなぎ何もしていないときは ICMP が多くなっていた。しかし、見守りカメラでは様々な protocols の packets が幅広く混在して利用されていることがわかった。

このことからリッチコンテンツではある protocols の利用に偏る傾向にあること、同じリッチコンテンツのトラフィックでもアプリケーション毎に主に使われている protocols の種類に違いがあることがわかった。また、IoT トラフィックでは基本的に利用されている protocols が多様化していることがわかったが、カメラの動作挙動の違いに応じて、protocols の利用率が変動することがわかった。このように、リッチコンテンツと IoT トラフィックでは protocols の利用率の分布に関して特徴が異なることがわかった。

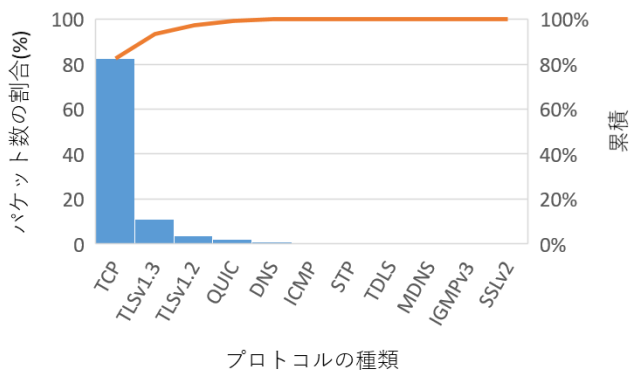


図 10 Yahoo ニュース閲覧時のプロトコルの種類

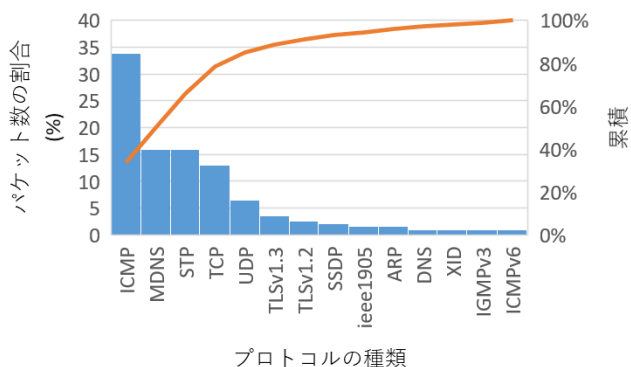


図 11 見守りカメラを1分間電源につなぎ何もしないときのプロトコルの種類

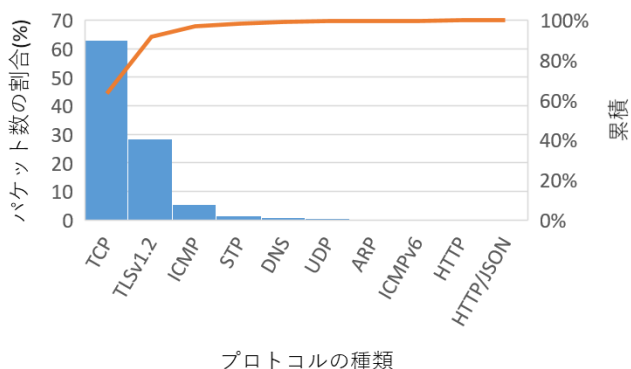


図 12 スマホで見守りカメラを操作したときのプロトコルの種類

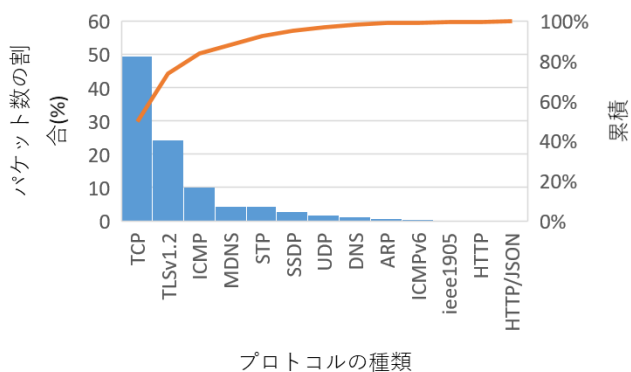


図 13 見守りカメラで動体検知を行ったときのプロトコルの種類

表 1 リッチコンテンツと IoT デバイスのトラフィック特性の比較

トラフィック種別	調査内容	最頻パケットサイズ[Byte]	最頻到着間隔[ms]	CDF80%時の利用プロトコル
リッチコンテンツ	動画(小)	1300	0.25 以下	UDP, QUIC
	動画(大)	1300	0.25 以下	QUIC
	Web データ	1400	0.25 以下	TCP
IoT トラフィック	IoT カメラ (放置)	100	20	ICMP 等様々なプロトコル
	IoT カメラ (制御時)	100	0.25 以下 (20 以上もほぼ同等の頻度)	TCP, TLSv1.2
	IoT カメラ (動体検知)	100	0.25 以下 (20 以上もほぼ同等の頻度)	TCP, TLSv1.2, ICMP

3. 考察

実験結果を表 1 にまとめた。実験結果からリッチコンテンツは、1300 バイト以上のサイズの大きなパケットが 0.25 ミリ秒以下のパケット到着時間間隔で送信されていることがわかった。さらに、YouTube の動画トラフィックではリアルタイム性を重視した UDP や QUIC プロトコル、Yahoo ニュースでは TCP が 8 割以上で送信されていることがわかった。一方で SwitchBot の見守りカメラでは、全ての動作パターンにおいて、多様なプロトコルのパケットが発生していることがわかった。次のパケット到着間隔に着目すると、カメラ操作時と動体検知においてサイズが小さなパケットが、「0.25 ミリ秒以下」と「20 ミリ秒以上」の到着間隔でほぼ同頻度で到着することわかった。特に、プロトコルに着目すると TCP が主として利用されていた。このように使用するアプリケーションと IoT デバイスの動作パターン、パケットサイズに応じて、主に使用されるプロトコルが変わり、それによってパケット到着時間間隔に違いがみられるため、使用するアプリケーションとパケットサイズ、パケット到着時間間隔、プロトコルの種類に関係性があると予想できる。

以上より、パケットサイズ、パケット到着時間間隔、プロトコルの種類を教師データとして、アプリケーションの推定を行うことは可能であると考えられる。しかし、推定値に基づくトラフィックの制御を行うにあたっては、リアルタイムな判断が必要である。本研究における実験では、各アプ

リケーションによる通信を通信開始から終了までの全パケットを事前に取得し、オフラインで特徴を分析したため、リアルタイムなトラヒックの推定、トラヒック制御を実現することができない。そこで今後は、通信中にオンラインで、アプリケーション通信開始時のトラヒック特徴を詳細、かつリアルタイムに特徴を分析し、制御する手法を考案する必要がある。

4. まとめ

今回は従来のリッチコンテンツのトラヒックの例として YouTube, Yahoo ニュース, IoT トラヒックの例として SwitchBot の見守りカメラのトラヒック特性の調査を行った。実験結果より、パケットサイズにおいてリッチコンテンツのトラヒックでは 1300 バイト以上のパケットの個数が全パケットに占める割合は 40%以上と最も多かったのに対し、IoT トラヒックでは 100 バイト以下のパケットの個数が全パケットに占める割合は 50%以上となり、最も多くなることがわかった。次に、パケット到着時間間隔に着目すると、リッチコンテンツのトラヒックはパケット到着時間間隔が比較的短く、IoT トラヒックは短い到着時間間隔と長い到着時間間隔が混在することがわかった。さらに、リッチコンテンツ内で比較すると、YouTube ではパケット到着間隔が 20 ミリ秒以上のパケットが全体の約 15%を占めていたのに対し、Yahoo ニュースでは全体の 1%未満となっていた。この結果から、YouTube と Yahoo ニュースではアプリケーション毎にパケットの発生頻度が異なることがわかった。最後にプロトコルの種類に着目すると、リッチコンテンツのアプリケーションや IoT デバイスの動作パターン毎で主に利用されるプロトコルの種類に違いがあることがわかった。

今後、機械学習でこれらの分類や推定を行うにあたって、YouTube, Yahoo ニュース, SwitchBot の見守りカメラ以外のトラヒックでもリッチコンテンツか IoT のトラヒックかを推定できる程度まで教師データを増やす必要がある。そのため、YouTube, Yahoo ニュース, SwitchBot の見守りカメラ以外のアプリケーションや IoT デバイスのトラヒック特性も調査する予定である。また、リアルタイムなトラヒック推定に向けて、通信開始時のパケットサイズやプロトコル等の特徴を詳細に分析する。

謝辞

本研究の一部は、財団法人電気通信普及財団研究調査助成により実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] IoT 検定ユーザ教育推進ワーキンググループ, 「図解即戦力 IoT の仕組みと技術がこれ 1 冊でしっかりわかる教科書」, 技術評論社, 2020 年 3 月 7 日
- [2] 総務省, 「令和 3 年版 情報通信白書 | IoT デバイスの急速な普及」, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/html/nid105220.html>, (参照 2023-2-17).
- [3] 坂本 大輔, 「図解即戦力 IoT 開発がこれ 1 冊でしっかりわかる教科書」, 技術評論社, 2020 年 11 月 20 日
- [4] 伊丹 誠, 「OFDM の基礎と応用技術」, Fundamentals Review Vol.1 No.2, pp.35-43, 2007 年 10 月. https://www.jstage.jst.go.jp/article/essfr/1/2/1_2_2_35/_pdf.
- [5] Cisco Systems, “IEEE 802.11ax : 第 6 世代の Wi-Fi”, https://www.cisco.com/c/dam/global/ja_jp/products/collateral/wireless/white-paper-c11-740788.pdf, (参照 2023-2-17).
- [6] 大神 達哉, 田村 瞳, 野林 大起, 塚本 和也, 「IEEE802.11ax 準拠の無線 LAN におけるダウンリンク OFDMA の評価実験」, 信学技報, vol. 122, no. 198, NS2022-88, pp. 33-38, 2022 年 10 月.
- [7] Rajesh Palit, Kshirasagar Naik, Ajit Singh, “Anatomy of WiFi Access Traffic of Smartphones and Implications for Energy Saving Techniques, ” International Journal of Energy, Information and Communications Vol. 3, Issue 1, Feb., 2012. https://gvpress.com/journals/IJEIC/vol3_no1/1.pdf