

携帯端末の Wi-Fi 接続パケット内の情報を用いた 人数・人流観測システムの検討

澤口翔^{†1} 秋田純一^{†1†2}

概要：本研究は Wi-Fi プロブリエクストのペイロード部に着目し、MAC アドレスに依存しない人流観測手法の可能性を検討するものである。ESP32 を搭載した M5Capsule を用いたパケットキャプチャデバイスを設計・実装し、「同じモデルの携帯端末の場合でも、生成されるプロブリエクストのペイロード部は異なる」という仮説の下で事前実験を実施した。結果、ペイロードには端末間で共通性がある一方で完全な一意性は確認されなかった。

1. はじめに

無線通信技術の発展に伴い、日常生活における人流観測の重要性が高まっている。特に、公共空間や商業施設において訪問者の動向を把握することは施設運営やサービス改善のための有用な情報となる。しかし、現在主流の MAC アドレスを利用した人流観測手法では MAC アドレスが一意性を持つが故に個人のプライバシー侵害に繋がる可能性が指摘されており、近年では多くの OS が MAC アドレスランダム化技術を導入している[1]。しかし、Mathy ら[2]は MAC アドレスのランダム化がプライバシー保護に十分でないことを指摘している。同研究によると、Wi-Fi Protected Setup (WPS) プロトコルに含まれるユニバーサル意識別子 (UUID) がランダム化された MAC アドレスの元アドレスを漏洩するケースがあることが報告されており、UUID が MAC アドレスから生成される仕様を逆算することで元の MAC アドレスを特定できる場合があることが実証されている。しかし人数・人流の計測に用いる端末のユニーク ID である MAC アドレスを完全に復元することはできない。

本研究では携帯端末が Wi-Fi アクセスポイントへの接続を常時試みる中で発出されるパケット (プロブリエクスト) のペイロード部に着目し、そこに含まれる情報を用いて人数・人流観測の可能性を検討する。

2. パケット観測デバイスの実装

スマートフォン等の携帯端末は Wi-Fi に接続されていない状態では一般的に常時 Wi-Fi アクセスポイントへ接続を試みる。このことは、自動的に接続する Wi-Fi アクセスポイントが存在しない屋外においては、携帯端末の数、すなわちそれを所持する人の数を計測する有効な手段となる。携帯端末が Wi-Fi アクセスポイントに接続を試みる際には、接続可能な Wi-Fi ネットワークを探索する際に送信するパケットである「プロブリエクスト」を発出している。このプロブリエクストのパケット、特にそのペイロード部

にはデバイスの対応プロトコルや機能情報などの端末に固有の情報が記録されている。このペイロード部に着目したアプローチは既存手法の課題であるプライバシー保護と一意性依存を克服し、より柔軟かつ低コストな人数・人流観測に利用できる可能性がある。本研究では Wi-Fi プロブリエクストを効率的に収集するためのデバイスを設計・実装した。このデバイスは M5Stack 社の M5Capsule (図 1) 用いており、内蔵するマイコン ESP32 の機能によって Wi-Fi パケットの受信と記録が可能である。Wi-Fi パケットの中からプロブリエクストのみを抽出する部分は、ESP-IDF フレームワークを用いて実装を行った。データの保存には microSD カードを使用し、データを CSV 形式で記録する。記録されるデータはタイムスタンプ、信号強度、送信元 MAC アドレス (プライベートアドレス)、ペイロード部、ユニーク ID (ペイロード部の SHA256 ハッシュ値) 及びシーケンス番号が含まれている。



図 1 パケットキャプチャに用いた M5Capsule

3. 事前実験とその結果

Wi-Fi プロブリエクストのペイロード部は MAC アドレスに依存せず人流を観測するための手がかりになる可能性があるが、その詳細な特性については十分に研究されていない。本研究ではこのペイロード部に着目し、従来の MAC アドレスを基にした観測手法に代わる新しいアプロ

^{†1} 金沢大学 自然科学研究科 電子情報通信学専攻

^{†2} 金沢大学 融合研究域 融合科学系

一チを検討するための基礎的な事前実験を実施した。事前実験では、「同じモデルの携帯端末の場合でも、生成されるプローブクエストのペイロード部は異なる」という仮説を立てた。この仮説を検証することによりペイロード部の特徴が観測対象の識別や分類にどの程度利用可能であるかを確認し、本研究の進むべき方向性を見極めることを目的とした。

3.1 予備実験

まず携帯端末が発出するプローブクエストを端末ごとに収集・比較検討するため、電波干渉を極力排除するために深夜の山奥という他にプローブクエストを発出する携帯端末が存在しない環境で記録を行った。観測対象として同じモデルの携帯端末を複数台準備し、それぞれの端末から発信されるプローブクエストを収集した。収集には、本研究で設計・実装した Wi-Fi パケットキャプチャデバイスを使用し、得られたデータを CSV 形式で保存した。収集後、ペイロード部を比較・分析することで同一モデルの端末間における一致率やパターンの特性を評価した。

収集されたデータの分析の結果、同じモデルの端末から送信されるプローブクエストのペイロード部はある程度一致することが分かった (図 2)。しかし、一部の端末では同一端末から複数種類のペイロードが生成される場合があることも観測された (図 3)。この結果からペイロード部が完全に一意性を持つわけではないものの、端末モデル間で共通する特徴が見られることが明らかになった。

3.2 イベント会場での人数計測

次に本手法での人数観測への有用性を調べるため、実装したデバイスを展示会イベント「NT 金沢」に設置し、パケットデータを記録した。NT 金沢の実施期間のうちイベント初日の 2024 年 6 月 22 日に会場である JR 金沢駅前のイベント広場に設置した。なお会場では、研究目的のデータ収集を行う旨、個人が特定される情報や通信の内容は収集されない旨、および記録を拒むことが可能であることとこの方法について掲示を行った。イベント会場がオープンスペースで自由来場が可能であるため正確な来場者数は把握できないが、一般公開期間の 10 時から 17 時を含めて 7 時から 23 時まで記録を行った。開催一般公開期間中は一般来場者が多数来場するが、それ以外ではスタッフや展示出展者のみであった。

記録したデータから、プローブクエスト中の端末に依存しないと思われる部分のみから生成したユニーク ID (SHA256 ハッシュ値) をもとに求めたユニーク ID 数の時系列分析した結果を図 4 に示す。この図から、イベント開始とともにユニーク ID の数が増加し、イベント終了後には減少する様子が確認できる。これらの結果からプローブクエストのペイロード部は観測対象を識別する手段として一定の有用性を持つことが分かった。

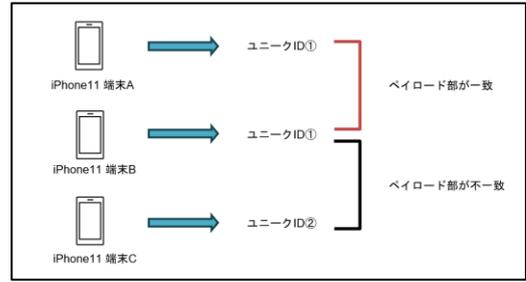


図 2 iPhone11 を 3 台分パケット取得した結果

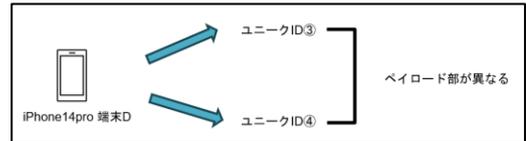


図 3 iPhone14Pro のパケットを取得した結果

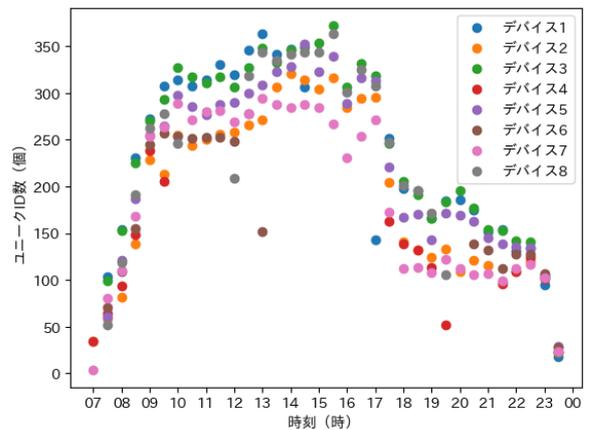


図 4 ユニーク ID 数の時系列変化

4. まとめと今後の展望

本研究では Wi-Fi プローブクエストのペイロード部に着目し、MAC アドレスに依存しない人流観測手法の可能性を探ることを目的として事前実験を行った。その結果、ペイロード部には同一モデルの端末間で一定の共通性が見られることが確認された一方で、完全に一意性を持つわけではないことも明らかとなった。この知見は MAC アドレスに代わる新たな観測データ源としてプローブクエストのペイロードが持つ可能性を示すものであり、これを基にした人流観測アルゴリズムの開発が今後の課題として浮かび上がった。今後の研究では編集距離などの文字列解析手法を活用しペイロードの特徴を定量的に評価することで、観測対象をより精度高く分類・識別する方法を検討する。また、観測アルゴリズムの性能を評価するために現実の人流を模したシミュレーション環境の構築が不可欠である。実際の人流データにおいて正確なグラントゥールズを取得することは困難であるためシミュレーションを通じて仮想的なデータセットを生成し、アルゴリズムの有効性を検

証する。

参考文献

- [1]株式会社 PFU, ” 社内の IT 機器特定に役立つ MAC アドレス、ランダム化の功罪と効率的な端末管理方法とは？”
<https://www.pfu.ricoh.com/inetsec/products/blog/blog21008.html>
(引用 2024-12-16)
- [2]M. Vanhoef and F. Piessens, “Why MAC address randomization is not enough: An Analysis of Wi-Fi Network Discovery Mechanisms,” in Proceedings of the 11th ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security, pp.413-424, 2016.