

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

澤口翔^{†1} 秋田純一^{†1}

概要: 本研究は Wi-Fi プロブリング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を検討するものである。M5Capsule を用いたパケットキャプチャデバイスを設計・実装し、異なる端末から同一ペイロードが生成される現象と、同一端末から複数ペイロードが生成される現象を明らかにした。また、これらの現象に対処する人流観測アルゴリズムを提案し、シミュレーションによる評価を行った。その結果、提案手法による人流観測の可能性が示唆された。

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、まずペイロード部の特性の分析を行い人流観測における課題を明らかにする。次に、これらの課題に対処するための人流観測アルゴリズムを提案し、シミュレーションによる評価を行う。

2. 予備実験とその分析

2.1 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「プロブリングクエスト」を発生している。このプロブリングクエストのパケット、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 プロブリングクエ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ングクエ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

2.2 電磁シールドルームにおける予備実験

Wi-Fi プロブリングクエ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ーチを検討するための基礎的な予備実験を実施した。予備実験ではペイロード部の特性を詳細に分析するため、石川県工業試験場の無電波空間（電磁シールドルーム）において 17 台のスマートフォンを対象に計測を行った。その結果、iPhone 14 Pro (iOS 18.1.1)、iPhone SE (iOS 18.1.1)、iPhone SE (iOS 16.0.3)、iPhone SE (iOS 16.5.1) の 4 台において、10 分間の計測中に完全に同一のペイロードのみが放出されることが確認された。これらは異なる機種・異なる OS バージョンを含むにもかかわらず一致しており、他の 13 台では同一ペイロードは確認されなかった。このことは、異なる端末から同一のペイロードが放出される可能性があることを示している。また、Redmi Note T10 (MIUI 14.0.15.0/Android 13) において、10 分間の計測中に 2 種類のペイロードが放出されることが確認された。これらのペイロードは編集距離で 1、類似度は 99.37%であり、158 文字中 1 文字のみが異なっていた。このことは、同一端末から微小な差分を持つ複数のペイロードが放出される可能性があることを示している。

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。

2.3 イベント会場における予備実験

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そ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、プローブリ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 2 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リ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。実際の人数との対応の詳細は別途検討を進める。

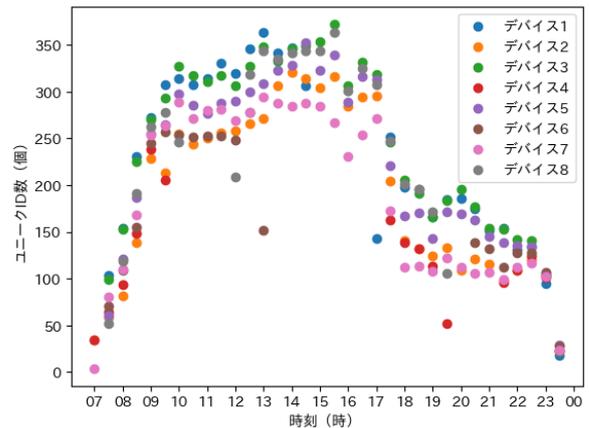


図 2 ユニーク ID 数の時系列変化

3. 人流観測アルゴリズムとその評価

3.1 人流観測アルゴリズム

ペイロード部を用いた人流観測では、前章で述べた「異なる端末から同一のペイロードが放出される現象」と「同一端末から微小な差分を持つ複数のペイロードが放出される現象」の 2 つの課題が存在する。これらの課題に対処するため、本研究では以下の 3 段階からなる人流観測アルゴリズムを提案する。第 1 段階では、類似度によるグループ化を行う。ペイロード部に対して編集距離を計算し、類似度 95%以上のものを同一グループとして統合する。これにより、同一端末から微小な差分を持つ複数のペイロードが放出される現象に対処する。第 2 段階では、物理制約による経路抽出を行う。同一グループ内の検知データを時系列順に走査し、検知器間の距離と経過時間から物理的に移動可能かどうかを判定する。歩行速度を 1.4 m/s と仮定し、最小移動時間より短い時間で異なる検知器に出現した検知データは別人のものと判断する。1 回の走査では各グループから 1 人分の経路のみを抽出する。これにより、異なる端末から同一のペイロードが放出される現象に対処する。第 3 段階では、抽出されなかった検知データに対して再度走査を行う。これを新しい経路が抽出できなくなるまで繰り返す。

3.2 シミュレータの設計

提案手法の評価のため、仮想的な人流データを生成するシミュレータを構築した。その構成図を図 3 に示す。このシミュレータは設定した人数の歩行者に対してランダムな経路を割り当て、検知器間の移動をシミュレーションし、各検知器での検知ログを生成する。そして、生成された検知ログに対して提案する人流観測アルゴリズムを適用し軌跡の推定を行う。最後に、推定結果とグランドトゥルースの比較を行い推定精度を評価する。評価では歩行者人数と時間ビン幅をパラメータとして設定した。時間ビンとは、各検知器への到着時刻を一定の時間幅で区切り、同一ビン内の到着を同時刻とみなす手法である。例えば、30 分ビン

の場合、11:05 と 11:20 に到着した 2 つの軌跡は同一の時間帯の到着 (11:00~11:30) として扱われる。これにより、グラントゥールズと推定結果の到着時刻に多少の誤差があっても同一ルートとして比較可能となる。時間ビン幅が小さいほど厳密な評価となり、大きいほど許容範囲が広がる。評価指標として MAE (平均絶対誤差)、RMSE (二乗平均平方根誤差)、および追跡率を採用した。追跡率は全ルート数に対して、グラントゥールズと推定結果の人数が完全に一致したルート数の割合として定義した。

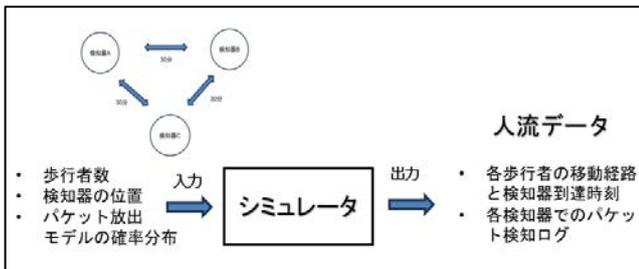


図 3 シミュレータの構成図

3.3 評価結果

歩行者数と時間ビン幅を変化させた場合の評価結果を表 1 に示す。各条件で 30 回の試行を行い、平均値と標準偏差を算出した。人数は 5 人、10 人、30 人、50 人、100 人とし、時間ビン幅は 15 分、30 分、60 分の 3 条件で評価を行った。

表 1 評価結果

人数	時間ビン幅	MAE(SD)	RMSE(SD)	追跡率
5	15	0.52(0.23)	0.70(0.21)	49.0%
5	30	0.38(0.28)	0.53(0.35)	63.7%
5	60	0.32(0.25)	0.50(0.35)	69.6%
10	15	0.60(0.18)	0.80(0.17)	43.3%
10	30	0.49(0.20)	0.73(0.21)	55.1%
10	60	0.40(0.21)	0.65(0.24)	63.2%
30	15	0.76(0.10)	0.88(0.07)	25.4%
30	30	0.68(0.13)	0.84(0.09)	33.9%
30	60	0.65(0.13)	0.82(0.10)	37.2%
50	15	0.80(0.05)	0.92(0.04)	21.2%
50	30	0.75(0.06)	0.89(0.05)	27.4%
50	60	0.71(0.06)	0.88(0.05)	32.1%
100	15	0.87(0.03)	0.95(0.02)	14.4%
100	30	0.84(0.03)	0.94(0.03)	18.7%
100	60	0.84(0.05)	0.96(0.04)	20.3%

4. まとめと今後の展望

本研究では、Wi-Fi プローブリ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検討した。まず、イベント会場における予備実験により、ペイロード部を用いた観測が人流の変動を捉えられる可能性を示した。次に、工業試験場での計測により、異

なる端末から同一のペイロードが生成される現象と、同一端末から複数のペイロードが生成される現象の存在を明らかにした。これらの課題に対処するため、類似度によるグループ化と物理制約による経路抽出を組み合わせた人流観測アルゴリズムを提案した。シミュレーションによる評価の結果、人数が増加するにつれて精度は低下し 100 人の場合は 60 分ビンでも追跡率 20.3%となった。一方、すべての条件において時間ビン幅を大きくすることで追跡率が向上する傾向が確認された。これらの結果は、提案手法により MAC アドレスに依存しない人流観測が一定の精度で可能であることを示唆している。

今後の課題として、人数増加に伴う精度低下への対処が挙げられる。具体的には、類似度の閾値や物理制約のパラメータの最適化やアルゴリズムの改善などが考えられる。また、リアルタイムで人流を観測・可視化できるようなシステム構築を行うことで実用的な人流観測システムへと発展できると考えられる。

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 2025-12-17)
- [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.