無線LANアクセスポイントを用いた店舗待ち時間予測

岡村 健太[1]　沼尾 雅之[1]

概要：スマートフォンを始めとしたモバイル端末の普及により多くの人が Wi-Fi 対応端末を携帯するようになり，端末数と人数には相関があると考えられる．本研究では Wi-Fi 端末が送信するプローブ要求 (ProbeRequest) パケットを利用して，遊園地や人気飲食店における人々の行列の待ち時間を予測する．プローブ要求に含まれる Mac アドレス情報をもとに計算された各端末の滞在時間から待ち時間予測を行う．これまでの我々の研究においては，シミュレータを用いて店舗周辺環境の人々の行動をシミュレートし，シミュレーション環境においてプローブ要求を収集することで待ち時間をある程度推測できることを示したが，実際の環境における実験は行えていなかった．本研究においては実際に営業されている食堂にて実験を行った．アクセスポイントと QR コードを用いた待ち時間計測システムを利用して，食堂周辺のプローブ要求の収集と各個人それぞれの列に到着した時間及び待ち時間を計測した．シミュレータの環境では階が存在しなかったが，実際の食堂では上下階の人の動きによるノイズも大きく影響されたためか，プローブ要求から予測した待ち時間は実際に計測した正確な待ち時間と比較して期待する精度での結果は得られなかった．またさらなる要因として，プライバシー保護のためにプローブ要求に用いられる Mac アドレスがランダム化が行われる端末の存在が発見された．ランダム化が行われると端末の滞在時間を正確に把握できなくなってしまうため，このランダム化に関する挙動の調査も行った．

Waiting Time Forecast With Wi-Fi Accecc Point

KENTA OKAMURA[1]　MASAYUKI NUMAO[1]

1. はじめに

人気の飲食店，遊園地の乗り物やスーパーのレジなど，日本での日常生活において我々は列に並んで待つという機会が多数ある．この行列による待ち時間は誰もが避けたいものであり，ディズニーランド等の遊園地においてはアトラクションごとに待ち時間を表示するシステムが存在するものもある．しかし飲食店などにおいてこのようなシステムの導入が見られるのはまれである．この理由として，導入が難しい，ランニングコストが高いなどの理由が考えられる．

本研究では無線 LAN アクセスポイントを用いて周辺のモバイル端末の発するプローブ要求を収集し，データを解析して待ち時間推定を行う．データ収集に用いる無線 LAN アクセスポイントの数は極力小さくすることでシステムの低コスト化を目指す．実際にサービスとして運用を考えたときに不便を感じない程度の精度を目標とし，5 分刻みでの待ち時間予測を行うことができるようなものを目指す．

実際に営業されている食堂に協力をお願いしてデータ収集を行い，実際の待ち時間データとプローブ要求から推測した待ち時間を比較して結果の考察を行う．

1.1 プローブ要求

スマートフォンなどの Wi-Fi 対応端末がアクセスポイントに接続する際，端末は周辺に存在するアクセスポイントを検索するためにプローブ要求 (Probe Request) パケットをブロードキャスト送信する．送信間隔は機種によって異なるが，概ね数十秒あるいは数分間隔で行われている [1][2].

プローブ要求フレームには送信端末の MAC アドレス及びシーケンス番号が含まれている．シーケンス番号とは各フレームに与えられる固有の番号であり，これは複数のアクセスポイントが受信したプローブ要求のうち同一のものを判別する際に利用でき，また一定値ずつ増加し続ける特

[1] 電気通信大学大学院 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻　〒 182–8585 東京都調布市調布ケ丘 1-5-1

Copyright (c) 2017 by the Information Processing Society of Japan

性もある．

1.2 プライバシーの保護

不特定多数に送信されている電波を独自に収集するという行為について，総務省のレポート [3] によると，Wi-Fi 位置情報として利用できうるプローブ要求は，十分な匿名化による適切なプライバシー保護が行われていれば通信以外の目的においても利用者の同意なく利用できるいう見解となっている．このため，プローブ要求に含まれる Mac アドレス情報に関してはハッシュ関数を適用して匿名化されたものを利用するものとし，プライバシー保護への配慮を行う．

2. 関連研究

2.1 無線 LAN アクセスポイントを用いた位置・混雑度の推定

中野ら [1] はプローブ要求を用いた屋内混雑度推定手法を提案しており，観測場所の地理的状況を分類したり入退室制約を考慮することで推測アルゴリズムを変化させている．少数のアクセスポイントを用いて部屋単位で位置推定を中心にして混雑度を判定し，部屋内にいる人数を判定している．位置推定を行うために事前に自前で用意した端末を用いて部屋の内外でプローブ要求データを学習させている．大植ら [4] は GPS や Wifi スポット [5] を用いてユーザ側から位置情報を送信してもらい，その情報を 1 つのサーバに集めてバス停の混雑状況を把握し，混雑を緩和するためのサービスを提案している．五十嵐ら [6] は食堂の座席と防犯カメラを利用してプローブ要求を用いた位置推定システムの誤差評価を自動的に行えるシステムを構築した．D. Vasisht ら [7] は複数アンテナを用いて 1 つのアクセスポイントから対象端末との距離を正確に検出する方法を提案している．複数周波数による電波を同時に送信し，それぞれの周波数の違いから生じる受信可能タイミングの違いを用いて距離を算出する物理的アプローチを行っている．

2.2 Mac アドレスランダム化についての調査

メジャーなスマートフォン端末に搭載された OS である iOS と Android では，新しいバージョンにおいて利用者のプライバシー保護のためにプローブ要求に利用する Mac アドレスをランダム化する処理が施されることがある．仕組み上は周辺アクセスポイントの探索に端末 Mac アドレスを利用する必要はないためこれは多くの端末で利用できる機能である．

Mac アドレスがランダム化されてしまうと，プローブ要求を取得した際にユーザを分類することができなくなってしまうため，ユーザごとのプローブ要求受信状況の時間的推移を得られなくなってしまう．

この Mac アドレスランダム化処理は iOS8, Android6.0 のバージョンでは既に導入されており，iOS の場合 iOS9 においてランダム化処理の適用条件が軽くなるなどの変更が行われ近年の動きは活発だったといえる．

ZEBRA TEXHNOLOGIES では [10] では iOS8 においてどのような条件でランダム化が行われるかを検証しており， 位置情報サービスとモバイルデータ通信を向こうにしたときにランダム化が適用されるなどの法則を導いているが，iOS9 以降において条件は変化しており，より適用されやすくなっている．M. Vanhoef ら [11] はシーケンス ID を用いる，WPS の仕様を用いるなどの方法からランダム化だけではプライバシーを保護するのには不充分であることを示している．

3. システム構成

実際の食堂において並んでいるお客さんのそれぞれの待ち時間及び食堂周辺で発されるプローブ要求を収集するために，プローブ要求収集システム及び QR コードを用いた待ち時間計測システムを作成した．また収集したプローブ要求を可視化して各端末を所持するユーザがどの時間にどの程度滞在していたかをわかりやすくするため，アクセスポイントごとにプローブ要求の受信状況をわかりやすくするための可視化システムを作成した．そして，収集したプローブ要求を解析するための解析手法の提案を行う．

3.1 プローブ要求収集システム

周辺のプローブ要求を収集するためのセンサとして，RaspberryPi に BUFFALO 製の無線 LAN アダプタ WLI-UC-G301N を装着したものを使用した (図 1)．周辺の Wi-Fi パケットをキャプチャするには無線 LAN アダプタをモニタモードとして動作させる必要があるが，WLI-UC-G301N にはチップセットとして RT3072 が使用されており，これは Raspbian 上の標準ドライバで簡単にモニタモードとして利用できる．これの他には，チップセット AR9271 が搭載されている LAN アダプタ 2 種 (TL-WN722N, AWUS036NHA) も Raspberry Pi 上で容易にモニタモードが利用可能であることを確認している．その他に調査したデバイスについては表 2 にまとめた．なお，RaspberryPi 3 には標準で無線 LAN アンテナが搭載されているが，そちらはモニタモードとして動作させることができない．今回は受信したプローブ要求をデータベースに保存するためにグローバルネットワークに接続するインターフェースとして使用した．

表 1 センサ端末のスペック

ハードウェア	Raspberry Pi 3
OS	Raspbian GNU/Linux 8
外付け LAN アダプタ	WLI-UC-G301N

専用のパケットキャプチャソフトを作成して RaspberryPi 上で起動させ，取得したプローブ要求のログを本体ス

Copyright (c) 2017 by the Information Processing Society of Japan

図 1　センサノードとして使用した RaspberryPi

表 2　Raspberry Pi 3 上でのモニタモード使用可否

アダプタ名称	チップセット	通常	モニタ	備考
DWA-182	rtl8812AU	○	×	
A6210	mt7612u	○	×	
A6200	bcm43526	×	×	ドライバ無
WI-U2-866D	bcm43526	×	×	ドライバ無
AWUS036NHA	AR9271	○	○	
TL-WN722N	AR9271	○	○	
WLI-UC-G301N	RT3072	○	○	

トレージに加え，REST API を通してネットワーク上のクラウドデータベースに保存した．プローブ要求のログ 1 件あたりに含まれる情報は次の通りである．

プローブ要求ログに含まれる情報

- 送信者の Mac アドレス
- 受信時刻
- 受信強度 (RSSI)
- シーケンス番号
- 受信したセンサノードの名前

3.2　QR コードを用いた待ち時間計測システム

各人の待ち時間を計測するための方法として，QR コードが記載されたシールを並ぶ各人に貼り付け，並び始めと並び終わりに 1 度ずつスキャンするという方法を採用した．QR コードをスキャンした際にスキャン時刻と QR コードに含まれるユニークな ID を保存することで，並び始めの時間と並び終わりの時間の差から待ち時間を計算することができる．各人の並び始めた時間と待ち時間を知ることができれば，それらを集計することで時間帯ごとの待ち時間や待ち人数も知ることができる．

QR コードのスキャンには専用の iOS アプリケーションを作成した．複数人の計測スタッフはそれぞれの持つ iOS 端末にアプリをインストールして，列の最後尾と人が並び終わったと判定できる場所（レジの前など）で待機し，並ぶ人，並び終わる人のそれぞれに貼り付けされた QR コードを端末に搭載されているカメラで読み取る．読み取ったあとはアプリが自動的に REST API を通してクラウドデータベースへログを送信する．同じ QR コードに対して並び始めた時間と並び終えた時間が記録されたとき，自動的にデータが処理され QR コードごとの並び始めた時間．並び終えた時間，待ち時間が記録されたレコードが生成される．

混雑前の待ち時間が全く発生していない状況でも貼り付け＆スキャンは行い人の到着を記録するようにした．

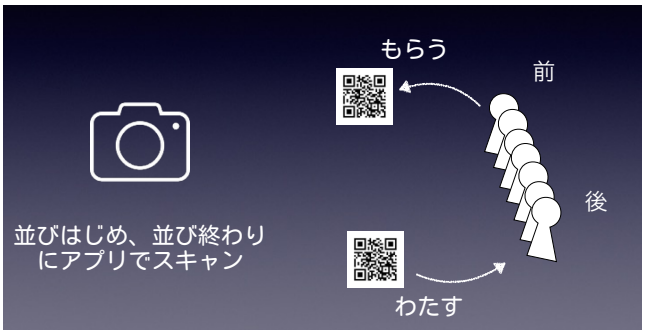

図 2　待ち時間計測システム概要

3.3　プローブ要求ログ可視化システム

プローブ要求で収集したログから実際に周辺にユーザが滞在していた期間を分かりやすく表現するために，取得したプローブ要求のログを可視化する専用のビューワアプリケーションを作成した（図 3）．

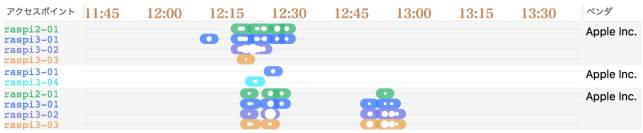

図 3　プローブ要求ログ可視化アプリ

1 つのアクセスポイントが受信した特定の Mac アドレスに対するプローブ要求が白い点で 1 行にプロットされ，特定の Mac アドレスが送信したすべてのプローブ要求が背景色で区別された大きな単位での 1 行で表されている．白い点の大きさは RSSI 値の大きさを表している．

図 3 の場合，大きな単位での 1 行目の端末は 12 時 15 分〜12 時 30 分に滞在，2 行目の端末はわずかしかプローブ要求を受信できていないことから通りすがりの人である，3 行目の端末は短い滞在が 2 回あることから食堂付近の建物で研究を行う学生が昼食を買うために食堂のそばを通って学外へ出かけてすぐに戻ってきたなどの可能性があり，食堂利用客ではないと考えられる．

このようにして，連続してプローブ要求が受信できている区間はその端末が周辺に滞在していたと判定されていることを確認できる．

Copyright (c) 2017 by the Information Processing Society of Japan

3.4 データ解析手法

プローブ要求収集システムで集めたプローブ要求ログから実際の待ち時間を予測するために，次の処理を順次行っていく．

(1) プローブ要求ログを Mac アドレス別に振り分け
(2) 受信時刻から各ユーザがどの時間帯に周辺に滞在していたかを判定
(3) 境界判定による位置推定から到着人数を予測
(4) 時間帯別の到着人数と M/M/1 モデルから待ち時間を予想

解析は時間帯ごとに行うものとする．今回は時間を 5 分ごとの時間帯に区切って，それぞれの時間帯の中での待ち時間を計算する方法をとった．

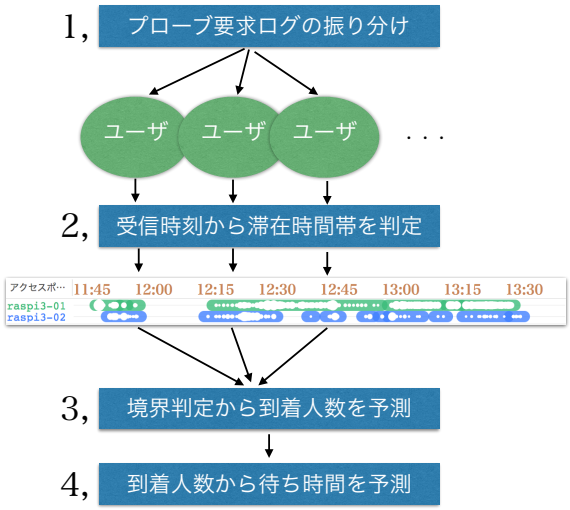

図 4 解析フロー

3.4.1 プローブ要求ログを Mac アドレス別に振り分け

プローブ要求には送信者の Mac アドレス情報が含まれるため，全レコードから特定の端末から送信されたプローブ要求のみをフィルタすることは容易だと考えられる．

1 人のお客さんが複数の端末を所持している場合はその分だけ多く人数がカウントされてしまうという問題が起こりうるが，Wi-Fi が OFF になっている，Wi-Fi は ON だが既にどこかのアクセスポイントに接続されていて（例えば，食堂付近では大学の共用アクセスポイントが利用できる）プローブ要求を出さない状態になっているなどの理由により端末を所持しているのにプローブ要求から捕捉できないユーザもいると考えられ，それらの誤差をふまえた上での精度で予測を行っていく．

3.4.2 受信時刻から各ユーザがどの時間帯に周辺に滞在していたかを判定

プローブ要求はバックグラウンドで定期的に送信されるものであり，その送信間隔は端末によって異なるがおよそ数分程度 [1][2] である．この性質から，数分おきに連続してプローブ要求を受信できている端末はその期間，周辺に滞在していたと判断することができる．

ただし，プローブ要求が届く範囲はアンテナのスペックや端末の保持状態（手で持っている，鞄の中にある），遮蔽物，さらには天気によって変化することも確認されている [8] ことを念頭に入れる必要がある．本実験では信号強度である RSSI 値が**-70** 未満のプローブ要求に関しては周辺に存在していても遠くに居るものとしてカウントしない方針にした．この値は経験則上，端末とアクセスポイントが同じ部屋にある場合に大抵の環境・端末で容易に満たせるものであり，これより RSSI 値が小さいものは 2 部屋以上離れていたり 50 メートル以上離れている場合が多いことから判断したものである．

3.4.3 境界判定による位置推定から到着人数を予測

一般的に RSSI 値はアクセスポイントに近いほど大きくなりやすい性質があるため，それを利用して 1 つのプローブ要求が複数のセンサノードで受信された場合に，最も大きな RSSI 値で受信できているセンサノードの近くにそのユーザがいると判定することができる．

このことを裏付けるために 4 章で後述する食堂にて簡易的な実験を行った．センサ名や設置場所については 4 章にて説明を行う．被験ユーザはスマートフォンを保持した状態で食堂を利用しつつ，自身の位置を逐次メモしてもらった．得られたプローブ要求ログを被験ユーザのスマートフォンからのプローブ要求のみにフィルタし，その結果を 3.3 項の可視化システムを用いて表現しつつ実際の行動メモも記載したものが図 5 となる．図中に存在するアクセスポイント（センサノード）の raspi3-01 は店舗内側，raspi3-02 は店舗外側に設置されたものである．

図 5 被験ユーザのプローブ要求と行動メモ

図から分かるように，列に並び始めた段階で店舗外側のセンサノードが先に被験ユーザの存在を検知し，その後入店時には店舗外側に強い RSSI 値が現れている．席について食事をする段階では店舗内部のセンサノードに対して強い RSSI 値が現れている．

このことから人が列に到着したかどうかを判定する方法について，ある時間帯にて店舗周辺にいると判定されている人の中で，お店の外側にあるセンサノードが先にプローブ要求を受信していた人をその時間帯に到着した人としてカウントすることにした．

Copyright (c) 2017 by the Information Processing Society of Japan

3.4.4 時間帯別の到着人数と M/M/1 モデルから待ち時間を予想

M/M/1 待ち行列モデルは窓口数 1 のサービスにおいて利用者の到着率から待ち人数を計算することができるモデルである．今回の食堂ではレジが 3 つあるが，その前に商品受け取りのためのカウンターが存在し，カウンターで待ち時間が発生しているケースが多いためにこのモデルを適用した．

M/M/1 モデルを用いた場合における時間帯ごとの待ち時間の計算式は以下のようになる．

待ち時間計算式

a = 時間帯あたりの到着人数
s = 店が時間帯あたり何人さばけるか（サービス率）
t_s = 1 人並び終えるのに平均何分かかるか
t_u = 単位時間
t_w = 待ち時間
として，

$$\rho = \frac{a}{s}$$

$$t_s = \frac{t_u}{s}$$

$$t_w = \frac{\rho}{(1-\rho)} \cdot t_s$$

4. 生協食堂における実験

3 章で紹介したシステムを用いて，実際に運営されている店舗で実験を行った．場所は電気通信大学 生活協同組合食堂 [*1] にて行い，この食堂は平日 12 時 10 分ごろをピークに混雑して待ち行列が発生し，その後 12 時 30 分ごろになるとピークが終わり列がなくなるという特性が経験則として知られている．食堂の管理責任者から許可を得て各種センサノードを設置，実験中である旨を示すポスターを周辺地域に貼り付けた．

生活協同組合 食堂の特徴

- 電気通信大学学内東地区にある建物の 2F にある
- 12 時 10 分ごろから行列ができる
- 12 時 30 分ごろには列はなくなる
- 座席数は約 300
- カウンターで商品を取り出したり注文して商品を受け取ってからレジで精算する，ミスタードーナツ方式
- 座席数は十分に足りており，カウンターにおける商品提供の遅れが列をつくる原因となっている

計測スタッフは列の最後尾で並び，来る人に QR コードのスキャンと貼り付けを行うグループと店内レジで人が並び終えたときにシールを剥がしてスキャンするグループの 2 グループに分けた．今回の実験では各グループ 2 名として人員を配置したが，混雑状況によってはシールの貼り剥がしとスキャンが間に合わないことがあったため余裕を持った人数で行うことが望ましい．

センサノードの設置箇所及び食堂内の簡易見取り図は図 6 となる．センサは図の丸部分に設置した．食堂は建物の 2 階にあり，階段からエントランスへ移動したのちに入店する形となっている．入口と出口は隣合っているが通路確保のために明確に区別されている．センサ 3-02 は壁付近にあった小さなテーブルの上，3-01 は柱の上部に設置した．

図 6 センサノードの設置箇所

実験は 2016 年の 7 月 26 日の 11 時 30 分から 12 時 30 分の間行った．

5. 実験結果及び考察

3.4.1 項のプローブ要求ログの分類と 3.4.2 項の受信時刻からの滞在時間判定から得られる，時間帯あたりの到着人数の推定について図 7 のような結果が得られた．

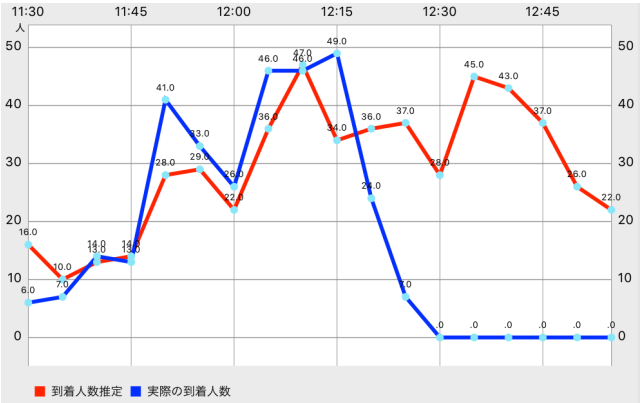

図 7 到着人数推定結果

[*1] http://www.uec.ac.jp/campus/welfare/restaurant.html

Copyright (c) 2017 by the Information Processing Society of Japan

グラフ中の青線が QR コードによる結果から得られた時間帯ごとの実際の食堂への到着人数で，赤線がプローブ要求ログデータから推測された到着人数である．グラフを読むと，12 時 15 分ごろまでは実際と推定の値がおおよそ似通った推移をしているが，それ以降については全く異なるものとなっている．12 時 30 分以降の実際の到着人数が 0 人である点については，実験当日の来客状況において 12 時 30 分ごろになると客がほとんど来ることがなくなったために計測を終了したため以降常に 0 人という結果になっている．

プローブ要求のある程度の距離を全方位に伝播する性質上，到着人数推定は通り過ぎただけで実際に入店していない人もカウントすることがあるが，それをふまえたとしても後半の推定到着人数は実際より過剰であり，前半の遷移がある程度一致していることの説明がつかない状態となっている．

続いて，3.4.4 項の待ち時間推定についての結果を図 8 に示す．

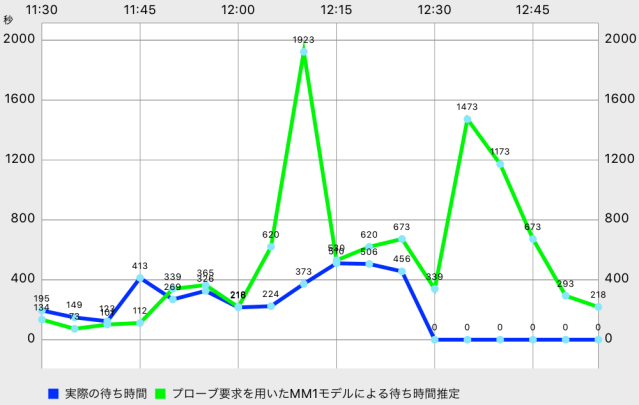

図 8　待ち時間推定結果

グラフ中の青線が QR コードによる結果から得られた時間帯ごとの実際の行列の待ち時間で，緑線がプローブ要求ログデータを用いて M/M/1 モデルから推測された待ち時間である．グラフは一部実際の値を大きく剥離してしまい，特に 12 時 10 分は推定待ち時間が大きく飛び出してしまっている．

12 時 10 分に大きく飛び出してしまった原因については，M/M/1 モデルを使用したことが考えられる．元々このモデルは到着率がサービス率を上回る場合（3.4.3 項の待ち時間計算式における ρ の値が 1 より大きい，すなわち列が無限に増え続けてしまう状況）は想定されていない．現実では到着率は可変であるため無限に列が増えることはないが，少なくとも 12 時 10 分においては列がさばききれず増え続けるほど人が到着していたために計算結果がおかしくなりこのような結果になってしまった．到着人数推定と同様にグラフ後半では大きなずれが生じてしまっている．

総じてどちらの推定も実測とずれてしまったことについて，食堂は 2 階に存在していたことから上下階の人々のプローブ要求が拾われていることも考えられる．特に食堂がある棟の 1 階は売店であり，食堂と同様に昼時は混雑が起こりうる．また次章で述べるランダム化処理も原因の 1 つだと考えられ，シミュレータ環境とは違い階の存在やランダム化が起こったことによってシミュレーション時のような結果 [9] は得られなかったと考えられる．

6. ランダム化されたプローブ要求の Mac アドレス

今回得られた実際のプローブ要求ログデータの中で，ベンダー名が不明 *1 な Mac アドレス及び da:a1:19 から始まる Mac アドレスを持つログデータが多数見受けられた（表 3）．出現レコードの中では未知ベンダのものが圧倒的に多いものとなった．

表 3　収集したプローブ要求のベンダ内訳

ベンダ名	出現数
unknown	20302
Sony Mobile Communications AB	8100
Apple Inc.	3828
Randomized Android(da:a1:19)	2154
HUAWEI TECHNOLOGIES CO.LTD	1993
SHARP Corporation	1750
FUJITSU LIMITED	1503
KYOCERA Corporation	1275
Murata Manufacturing Co. Ltd.	1200
HTC Corporation	1100
other	2840
合計	46045

6.1 iOS におけるランダム化 Mac アドレス

iOS 端末のプローブ要求がランダム化された際にどのような Mac アドレスが出力されるか簡易的な実験を行った．センサノードの上に iOS 端末をプローブ要求が定期的に送信する状態（Wi-Fi は有効だがどのアクセスポイントにも接続していない状態でスリープ）を置いてセンサノードと iOS 端末を金属片で覆い，出来る限り他のプローブ要求がセンサに拾われないようにした．このようにすることで iOS 端末以外からのプローブ要求は極端に RSSI 値が小さくなるため，RSSI 値が大きいもののみをフィルタすることで iOS 端末からのプローブ要求のみを取得することができる．

実験は iOS10.3.2 が搭載された iPod Touch 6th と iOS10.1.1 が搭載された iPad mini 4 で行った．その結果，取得された全てのプローブ要求のベンダ名は unknown

*1 今回，ベンダ情報は IEEE のサイト [12] から借用したものを利用している．

Copyright (c) 2017 by the Information Processing Society of Japan

となり，表 3 で登場していた unknown ベンダのレコードの何割かは iOS 端末からのものではないかと推測された．

またランダム化のタイミングは端末を常にスリープにしていた場合，前回変化してからおよそ 3 分後と 9 分後の交互に行われていることがわかった．しかしながら端末をスリープから復帰する際にもランダム化が行われるため実用上は常に一定のタイミングで変化するとは言えない．

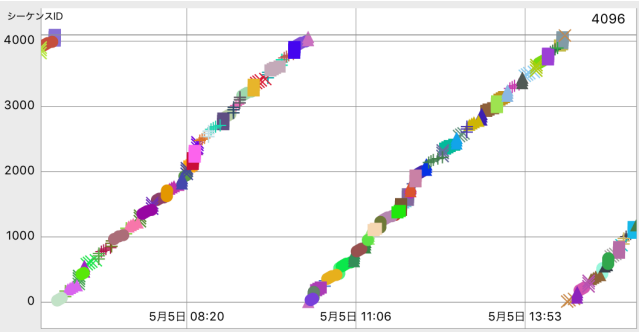

図 9　iPodTouch6th におけるプローブ要求

図 9 は上記の方法で取得した iPod Touch 6th からのプローブ要求のみを時間とシーケンス ID でプロットしたグラフである．実際には取得したプローブ要求のうち RSSI 値が-30 以上のものでフィルタしたものであるが，明らかに 1 つの端末からのプローブ要求の集合であることがシーケンス ID の変化から予想される．また異なる色・図形のプロット点はそれぞれ異なる Mac アドレスを表しており，頻繁に Mac アドレスが変化していることが確認できる．

シーケンス ID が同一端末で連続的に変化することからシーケンス ID の遷移を追跡すれば異なる Mac アドレスでも 1 つの端末として見なせる可能性があるが，複数端末が存在すると他の端末のプローブ要求の類似シーケンス ID のものと区別がつきづらく，現状としては実用的な方法を提案できていない．

6.2　Android におけるランダム化 Mac アドレス

Android はオープンソースソフトウェアであるため，内部で行われているロジックを自由に閲覧することができる．該当部分のソースコード [13] によると Android におけるランダム化 Mac アドレスは全て da:a1:19 の prefix を持つことがわかる．表 3 ではこのランダム化された Android 端末からのプローブ要求が 2154 件現れていたことが示されており，いくつかの Android 端末は正しく滞在を認識できない状態であったことがわかる．こちらのランダム化のタイミングは実際に計測はしていないが，実験ログデータから該当 Mac アドレスのものを見る限りは数分おきに変化しているように見える．しかし一部不規則なものもあり，調査が必要である．

7.　おわりに

実際の環境における推定は，到着人数推定に関しては何かしらの改良でより現実的な結果を得られそうな結果を得られたが，待ち時間の推定に関しては全くうまくいっておらず推定モデルを考え直す必要があるとわかった．また今回の実験でアナウンスからはわかっていたが実際に普及しているかは分からなかった Mac アドレスのランダム化は確実に普及が始まっているということがわかり，Mac アドレスからユーザを判断して滞在時間を計算することができなくなってしまったためによりいっそう解析が難しくなったといえる．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17H01823 の助成を受けたものです．

参考文献

[1] 中野 隆介，沼尾 雅之：無線 LAN アクセスポイントへの検索要求を用いた屋内混雑度推定手法，日本データベース学会論文誌，Vol.12，No.1，pp.121-126，(2013)

[2] 望月 祐洋，鬼倉 隆志，福崎 雄生，西尾 信彦：Wi-Fi パケット人流解析システムの実環境への適用，DICOMO2014

[3] 位置情報プライバシーレポート ―位置情報に関するプライバシーの適切な保護と社会的利活用の両立に向けて― (http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban08_02000144.html)

[4] 大植 達也，北上 眞二，清原 良三：学生の行動モデルを活用した通学支援システムの検討，DICOMO2013

[5] 梶克彦，河口信夫：UGC を利用した 無線 LAN 屋内位置情報基盤，情報処理学会論文誌，Vol. 52 No. 12 3263 − 3273 (Dec 2011)

[6] 五十嵐 裕也，櫻田 武嗣，山井 成良，北川 直哉：無線 LAN 信号強度による端末位置推定における防犯カメラ画像を利用した精度の計測，DICOMO2016

[7] D. Vasisht，S. Kumar，D. Katabi：Decimeter-Level Localization with a Single WiFi Access Point，USENIX，(March 2016)

[8] 横堀 哲也，沼尾 雅之：プローブ要求を利用したスマートフォンユーザー向け屋内位置推定手法，情報科学技術フォーラム講演論文集 Vol.13，(2014)

[9] 岡村 健太，沼尾 雅之：無線 LAN アクセスポイントを用いた店舗待ち時間予測，DEIM2016

[10] ZEBRA TEXHNOLOGIES：Analysis of ios 8 MAC Randomization on Locationing，http://mpact.zebra.com/documents/iOS8-White-Paper.pdf

[11] M. Vanhoef，C. Matte，M. Cunche，L. Cardoso，and F. Piessens：Why MAC Address Randomization is not Enough: An Analysis of Wi-Fi Network Discovery Mechanisms．AsiaCCS，(May 2016)

[12] IEEE：MAC Address Block Large https://standards.ieee.org/develop/regauth/oui/

[13] Google：com.android.server.wifi.WifiStateMachine.java https://android.googlesource.com/platform/frameworks/opt/net/wifi/+/android-6.0.1_r10/service/java/com/android/server/wifi/WifiStateMachine.java

Copyright (c) 2017 by the Information Processing Society of Japan