

BLE アドバタイズパケットによる都市人流推定の実践 ～佐賀市における国スポ開催期間のデータ分析と考察～

林 虎太朗¹ 吉村 太斗¹ 小林 博之² 今村 亮³ 伊藤 みな² 牛島 清豪² 諏訪 博彦^{4,5,a)}
松田 裕貴^{1,4,5,b)}

概要：近年、都市の効率的な運営や商業戦略の立案において、人流データの活用が重要視されている。しかし、従来の AI カメラや 3D 通過センサを用いた手法は設置・運用コストが高く、Wi-Fi や Bluetooth を活用した手法は、近年導入された MAC アドレスの動的ランダマイズに対応できないという課題がある。本研究では、複数の BLE スキャナを用いて取得した BLE アドバタイズパケットの MAC アドレスをアドレスの出現時刻・消失時刻・Advertising Data を基に紐付けることで人流を推定する手法に焦点を当てている。本手法の有効性を検証するため、佐賀県佐賀市に 30 台のスキャナを 60 日間設置してデータ収集を実施した。本稿では、その実践経験やデータ分析の結果から BLE を用いた人流推定の可能性や解決すべき課題について考察を行う。

キーワード：スマートシティ、人流推定、人流分析、Bluetooth Low Energy

1. はじめに

都市の効率的な運営や商業戦略の立案において、都市空間を往来する人の移動（人流）の把握は極めて重要である。国土交通省が公表した「地域課題解決のための人流データ利活用の手引き」[1]によれば、人流データは「現状把握」、「施策の効果検証」、「予測等の基礎資料」といった分野で活用が想定されており、他のデータとの組み合わせによる EBPM (Evidence-based Policy Making : 証拠に基づく政策立案)への活用が期待されている。このような背景から、人流データの収集と利活用に対する関心は年々高まっている。

しかし、人流の把握を人手で行うには多大な人的コストが伴い、特に個人単位での移動経路を詳細に把握することは困難である。これを解決するための手段として、カメラ、3D 通過センサ、LiDAR などを用いた人流推定手法が提案されている [2–5]。しかし、これらのアプローチは機器の設置や運用にかかるコストが高いという課題がある。さら

に、Wi-Fi や Bluetooth のパケットを活用した人流推定手法 [6, 7] も存在するが、近年導入されたプライバシ保護のための MAC アドレスの動的なランダマイズには対処していない。そこで著者らは、複数台の BLE スキャナを用いて取得された、動的にランダマイズされる MAC アドレスを出現時刻・消失時刻・Advertising Data などの情報を基に紐付けることで、人流を推定する手法 [8] を提案している。

本手法の有効性の検証のため、佐賀県佐賀市の「佐賀駅」を中心とする約 2.5km の区間において、30 台の BLE スキャナを 60 日間にわたり設置し、BLE データ収集実験を実施した。また、実験期間中に収集した GPS ログを正解経路データとして用い、提案手法によって推定された経路との比較評価を行なった。その結果、本研究の手法により推定された経路データの正解経路データに対する網羅率は、移動手段が歩行の場合は平均 70.9%，自転車で平均 46.2%，全体平均 66.0% となった。本手法の適用前と比較すると、歩行の場合は 9.5%，自転車の場合は 3.4%，全体では 8.3% 網羅率の向上が確認され、本手法の有効性が示唆された。

本稿では、佐賀市において本手法による人流推定を実施した際の知見、失敗事例、ならびに人流の可視化・分析の取り組みについて報告する。

¹ 岡山大学, Okayama University

² 株式会社ローカルメディアラボ, Local Media Labs Inc.

³ 佐賀市, Saga City Office

⁴ 奈良先端科学技術大学院大学,
Nara Institute of Science and Technology

⁵ 理化学研究所, RIKEN AIP

a) h-suwa@is.naist.jp

b) yukimat@okayama-u.ac.jp

2. 関連研究

2.1 人流推定

人流推定に関しては、様々なアプローチが提案されている。Wang らは、複数台のカメラを用いた人物再同定技術により人の移動をトラッキングする手法を提案している [2]。高野らは、AI カメラを活用した都市人流計測手法を提案している [3]。具体的には、複数の AI カメラで「検知時刻、入退場、性別、年齢、マスクの有無、傘の有無」といった情報を収集し、各観測点で得られたそれらの情報を照合することで個人の移動を推定している。永田らは、3D 通過センサを用いた人流推定手法を提案している [4]。この手法では、対象エリアの全出入り口に設置した 3D 通過センサで「身長、歩行速度、通過時刻、通過方向」といった情報を収集し、各観測点で得られたそれらの情報を照合させることで人流を推定する方法を提案している。また、Yamaguchi らは、LiDAR を用いた人流推定手法「Hitonavi」を提案している [5]。これらの手法はいずれも高精度な人流推定が可能である一方で、機器の設置や運用にかかるコストが高いため、実用が容易ではない。

2.2 Wi-Fi・Bluetooth を用いた人流推定

スマートフォンの普及に伴い、それらが発信する Wi-Fi や Bluetooth 信号を利用した群衆センシングや人流推定に関する研究が行われている。

群衆センシングの観点からは、特に空間の混雑度に関する研究が多くみられる。Weppner らは、移動中の人々のモバイル端末によって周囲の BLE 信号を受信し、近傍の BLE 端末数を集計することで群衆密度を推定する手法を提案している [9]。また Matsuda らは、都市空間に点在する飲食店や公共施設などの混雑度を、BLE 信号のみを用いて推定する手法を提案している [10]。

特定地点の混雑度だけでなく、人々の移動に焦点を当てた人流推定に関する研究も多く取り組まれている。Versichele らは、複数の Bluetooth スキャナを用いて複数地点で Bluetooth の MAC アドレスを収集し大規模イベント会場での近接ベース Bluetooth トラッキング手法を提案している [6]。望月らは、複数台の Wi-Fi スキャナを用いてその間で同一 MAC アドレスがあれば移動端末とみなす起始、移転ポイント、終点を抽出し移動軌跡を生成する手法を提案している [7]。これらの手法は近年導入されたプライバシ保護のための MAC アドレスのランダム化に対処する方法について触れられていない課題がある。また、後藤らは、2 台の BLE センサから得られる時系列データとともにデータ間の差分を作成しクラスタリングを行い、各クラスタに所属する BLE アドレス量を特徴量として、2 方向の通行量を推定する手法を提案している [11]。この手法では、ある

表 1: スキャナ設置場所

ID	設置場所名	備考
1	SAGA アリーナ	ネットワークに接続できず時刻同期できていない
2	ANzee.	10/12, 10/15 スキャナ停止あり
3	もしもししかめさん	
4	SUNRISE POCKET	
5	ROUGH cafe&dining bar	~11/18までのスキャナのファイルシステム破損
6	かど屋佐賀駅北口店	
7	サガハツ	
8	えきまちー丁目	10/20 スキャナ停止あり
9	佐賀駅バスセンター西側	
10	佐賀駅バスセンター構内	
11	駅前交流広場	
12	駅前中央通り ニッポンレンタカー前	サガ・ライトファンタジー期間中 17:00~22:00 稼働
13	駅前中央通り とも蔵・わん前	サガ・ライトファンタジー期間中 17:00~22:30 稼働
14	駅前中央通り 三井住友銀行前	サガ・ライトファンタジー期間中 17:00~22:30 稼働
15	村岡屋 本店	
16	E.A.D	
17	まちかど広場	
18	緑道広場	
19	すし・椿油天ぷら八木	営業日の営業時間中のみ稼働
20	白山テラス西	
21	白山テラス東	
22	白山名店街 自動販売機横	
23	トネリコ・カフェ	
24	エスプラット北	
25	エスプラット西	
26	エスプラット南	
27	エスプラット南東	
28	たなかさんち	
29	FabLab Saga	
30	656 広場	

地点において群衆がどの方向に何人移動したかのみ推定するため、どこからどこへ移動したかの軌跡を得ることができないという課題がある。これらの課題を踏まえ、著者らはランダム化する MAC アドレスに対応する都市人流推定手法の実現可能性を探るための事前実験を行っている [8]。

2.3 ランダム MAC アドレス紐付け

秋山らは、1 台の BLE スキャナを用いて MAC アドレスがランダム化される BLE 機器が移動する際の同定手法を提案している [12]。この手法では BLE のセンシングパケットとして COCOA（新型コロナウイルス接触確認アプリ）[13] のパケットを用いているため、センシング可能な対象は COCOA をインストールしているデバイスに限られる。また、新型コロナウイルス感染症の取り扱いの変化に伴い、同アプリは 2022 年 11 月に機能を停止していることから、この手法を今後利用することは困難である。

2.4 研究の位置付け

ここまで触れてきたように、人流推定を行う手法はいくつかあるが、文献 [3-5] などの手法はセンシングデバイスに高いコストがかかるという課題が、文献 [6, 7] などの手法ではランダム化する MAC アドレスに対応していないという課題がある。そこで本稿では、低コストかつランダム化する MAC アドレスに対応する複数台の BLE スキャナを用いた都市人流推定手法の実践を報告する。



図 1: スキャナ設置場所

3. 佐賀市での実験

3.1 実験概要

実験期間は2024年9月26日から11月24日までの60日間とし、実験環境は図1に示す佐賀県佐賀市内の「SAGAアリーナ」から「佐賀駅」を経由し「白山名店街」までの約2.5kmの区間とした。この区間に30台（表1）のBLEスキャナを設置し、それぞれに1から30までのスキャナIDを割り当てた。スキャナの設置例は図2に示す。なお、実験期間中のスキャナの故障や稼働制限の詳細は表1の備考欄にまとめた。また、提案手法の性能を検証するため、GPSデータを加工して正解経路データを生成し、評価指標として用いた。GPSデータの収集は、GPSロガーとBLE発信デバイス（iPhone）を携帯した被験者が実験エリア内を移動することで行った。正解経路データは、移動パター



図 2: スキャナ設置例

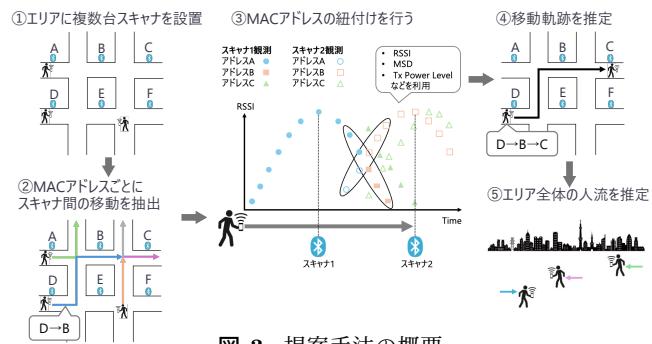


図 3: 提案手法の概要

ンが徒歩の場合の12サンプルと、移動パターンが自転車の場合の3サンプルとの合計15サンプルである。

3.2 人流推定手法

適用した人流推定手法の概要を図3および以下に示す。

(1) エリアに複数台スキャナを設置する

実験エリア内に複数台のBLEスキャナを設置し、BLEデバイスからデータを収集する。

(2) MACアドレスごとにスキャナ間の移動を抽出する

各スキャナ間で同一のMACアドレスを抽出することで、BLEデバイスがMACアドレスをランダマイズするまでの間の移動順序、時刻を特定する。

(3) MACアドレスの紐付けを行う

MACアドレスの変化をアドレスの消失時刻・出現時

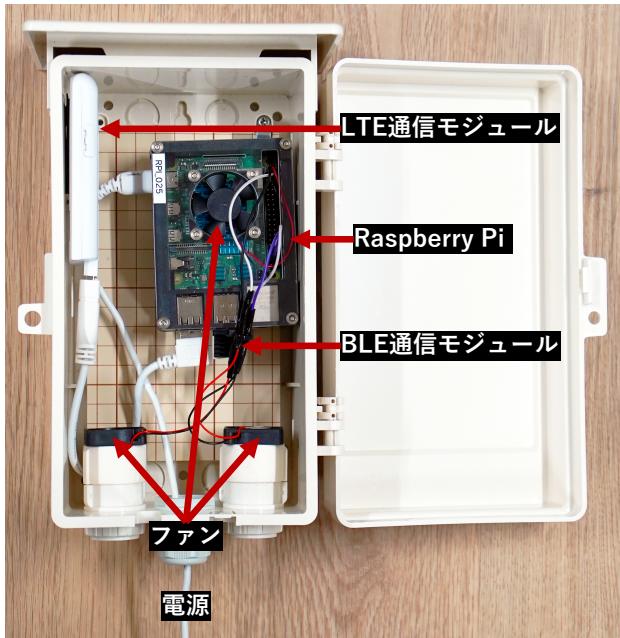


図 4: スキャナ構成

刻・RSSI・Advertising Data を基に紐付ける。

(4) 移動軌跡を推定する

ステップ 3 の MAC アドレスの紐付けを繰り返し、条件を満たす MAC アドレスの組がなくなるまで再帰的に実行することで、1 台の BLE デバイスに対応する移動軌跡を推定する。

(5) エリア全体の人流を推定する

ステップ 4 の処理をすべての BLE デバイスに適用することで、実験エリア内の人流を推定する。

3.3 スキャナの構成

BLE アドバタイズパケット収集デバイス（スキャナ）は、Raspberry Pi 4 Model B^{*1}または Raspberry Pi 5^{*2}を使用して、図 4 に示すように構成した。BLE 収集部分には、Bluetooth 4.0+EDR/LE Class1 対応 USB アダプタ（BUFFALO 社製、BSBT4D100）を取り付けた。Raspberry Pi 4 Model B および Raspberry Pi 5 は Bluetooth 通信モジュールが内蔵されているが、スペックを統一するため外付けモジュールを使用している。アドバタイズパケットの収集には、Python 用ライブラリの bluepy^{*3}を使用した。また、スキャナの稼働状況の確認および時刻同期を目的として LTE 通信モジュールを用いた。具体的には、LTE 対応 USB ドングル（PIXELA 社製、PIX-MT110、または、富士ソフト社製、+F FS040U）を接続した。本実験は 9 月末に開始され、気温が 30°C を超える環境であつ

*1 <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

*2 <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/>

*3 <https://github.com/IanHarvey/bluepy>

たため、スキャナの過熱を防ぐための対策を講じた。具体的には、スキャナ本体、プラスチック製防雨ボックスにファンを取り付け、外付けの Bluetooth 通信モジュールにはヒートシンクを装着して排熱を強化した。さらに、雨風から保護するためにプラスチック製防雨ボックス（未来工業社製、WB-1AM）を使用した。

3.4 実験結果

佐賀市で 60 日間にわたって実施した BLE データ収集実験により、約 1.4 億レコードのデータが得られた。このデータに対しては、3.2 節で示した人流推定手法にを適用し、得られた推定経路データを GPS による正解経路データと比較し、網羅率を評価した。その結果、移動手段が徒歩の場合（12 サンプル）は平均 70.9%，自転車の場合（3 サンプル）は平均 46.2%，全体（15 サンプル）では平均 66.0% の網羅率が得られた。また、3.2 節のアドレスキャリーオーバー手法を適用することにより、適用前と比較して、徒歩の場合は 9.5%，自転車の場合は 3.4%，全体では 8.3% の網羅率向上がみられた。これらの結果から、特に徒歩による移動において、アドレスキャリーオーバー手法が有効に機能し、人流推定の精度向上に精度の向上に貢献したと考えられる。

3.5 アドレスキャリーオーバーの失敗パターン

GPS による正解経路データと、人流推定手法によって推定された経路データをグラフ上に可視化した（図 5、図 6、図 9）。赤線は GPS 正解経路を示し、その他の色の線は各 MAC アドレスごとの推定経路を示している。横軸は訪問スキャナ ID を時系列で表し、アドレスキャリーオーバー手法によって紐付けされた MAC アドレスは同一の高さで描画されている。なお、白丸はスキャナにおいてアドレスが捕捉されなかったことを示す。推定経路データにおいて、アドレスキャリーオーバーに失敗したパターンが主に 2 種類確認された。以下にそれらを示す。

3.5.1 スキャナ間の物理的距離に起因する失敗

本項では、GPS 正解経路データがある 15 経路のうち、スキャナ間の物理的距離に起因して MAC アドレスの紐付けに失敗した経路について、経路 ID1（図 5）および経路 ID15（図 6）を例に詳述する。図 5 に示す経路 ID1（移動パターン：徒歩）では、スキャナ間の物理的距離によってアドレスの紐付けに 2 回失敗した。address1 と address2 が紐付けられなかった原因は、スキャナ 5 の故障の影響もあり、address1 が最後に観測されたスキャナ 4 と、address2 が最初に観測されたスキャナ 6 の間の距離が約 500m 離れてしまったためだと考えられる。スキャナ間の距離が離れた場合、いずれのスキャナにもアドレスが捕捉されない時間が生じ、その間にアドレスが変化してしまうことで、紐付けの失敗につながったと考えられる。また、スキャナ

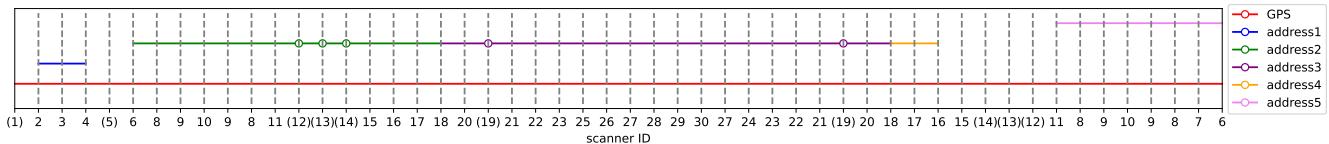


図 5: 経路 ID1



図 6: 経路 ID15



図 7: スキャナ 15 の位置

15でアドレスを捕捉できなかった要因としては、ユーザが図7のようにスキャナ15の設置場所の車道を挟んで反対側を移動していたことが考えられる。ユーザの所持デバイスが発信したBLEアドバタイズパケットは、車両やスキャナ横の壁などの障害物によりスキャナに届かなかつた可能性がある。さらに、address4とaddress5が紐付けられなかつた原因としては、スキャナ15でアドレスが捕捉されてなかつたことに加え、スキャナ12, 13, 14が稼働時間外であったことで、address4が最後に観測されたスキャナ16とaddress5が最初に観測されたスキャナ11の間の距離が約500mほど離れてしまったことが考えられる。

図6に示す経路ID15(移動パターン:自転車)では、スキャナ間の物理的距離によってアドレスの紐付けに1回失敗した。スキャナ27でアドレスを捕捉できなかつた原因是、図8のようにユーザがスキャナ27の設置場所の車道を挟んだ反対側を移動していたことに加え、移動手段が自転車だったことが影響したと考えられる。BLEアドバタイズパケットは、車両などの遮蔽物によりスキャナに届かなかつたか、ユーザの移動速度が速かつたため、スキャナが電波を検出できなかつた可能性がある。address2とaddress3が紐付けられなかつた原因も、前述の経路ID1の紐付け失敗と同様と考えられる。スキャナ27でアドレス



図 8: スキャナ 27 の位置

表 2: 物理的な距離に起因する失敗概要

スキャナの組	距離	件数
4-6	約 500m	4
11-16	約 400m	1
18-17	約 300m	1
30-24	約 300m	1
3-4	約 200m	1
30-27	約 200m	1

が捕捉されていなかつたことによりaddress2が最後に観測されたスキャナ30と、address3が最初に観測されたスキャナ24の間に約300mの距離があり、この間にアドレスが変化したことが紐付けの失敗の要因だと考えられる。

このようなスキャナ間の物理的距離に起因する紐付けの失敗は他にも5個の経路で確認されており、15個のGPS正解経路データのうち7個の経路において、合計9回の紐付け失敗が発生している(表2に概要を示す)。Bluetooth通信の最大到達距離はクラスにより異なるが、一般に最大で100m程度とされている。このため、スキャナ間の距離が200mを超える場合アドレスを捕捉できない時間が発生

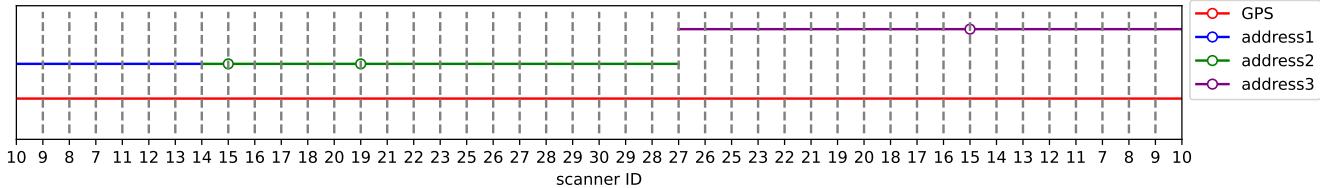


図 9: 経路 ID6

し、結果としてアドレスの紐付けに失敗する可能性が高まることが実環境においても明らかとなった。さらに、表 2 の結果からスキャナ間の距離が約 500m に達した場合には、紐付け失敗の発生確率が顕著に増加する傾向が見られた。このような結果から、スキャナ間の間隔を短縮し高密度に設置することで、アドレス補足の失敗を低減できる可能性が示唆される。しかしながら、スキャナの設置や運用にかかるコストはその分増大するため、コストと性能のバランスを考慮した、最適なスキャナ配置間隔について、今後更なる実験的検証が必要であることがわかった。

3.5.2 正解アドレス以外のアドレスと紐付いて失敗

本項では、正解アドレスではない他の MAC アドレスと誤って紐付けられることにより、アドレスキャリーオーバーに失敗した経路 ID6 (図 9) について詳述する。経路 ID6 (図 9) の address2 と address3 は同じスキャナで観測されていることから、紐付けが行われることが期待される。しかし、実際には address2 に対して誤ったアドレス (addressX) が紐付けられたため、正しい紐付けは行われなかった。今回採用した手法ではアドレスの出現・消失時刻のみに基づいて紐付けを行っていたため、addressX の出現時刻と address2 の消失時刻の絶対差が、address3 の出現時刻と address2 の出現時刻の絶対差と等しかったことが、誤った紐付けを引き起こした原因と考えられる。

また、経路 ID6 のようにアドレスキャリーオーバーの失敗には直接的に関与していない場合でも、明らかにユーザデバイス以外のアドレスと誤って紐付けられていた事例は 2 件確認された。これらの誤った紐付けは、時刻情報のみに基づいた紐付け処理によって生じたと考えられる。今後は紐付け処理において時刻情報だけでなく、RSSI の推移情報や Tx Power Level などの情報を考慮することで、誤った紐づけを抑制できる可能性がある。

3.6 人流の増減の可視化

イベントの開催時と平常時における人流の増減を比較するため、実験期間中に開催された佐賀市の主要イベントを表 3 に示す。本項では、平常時と SAGA2024 国スポや佐賀さいこうフェス、V.LEAGUE などのイベントの開催時における人流の増減の可視化を行った結果について述べる。可視化に際しては、エリアの分割について佐賀市と協議を行い、図 10 のようにエリア分けを設定した。なお、

表 3: 実験期間中佐賀市主要イベント

期間	イベント名	主な開催地
2024/10/05~15	SAGA2024 国スポ	SAGA アリーナ
2024/10/04~	サガ・ライトファンタジー	佐賀市中央大通り
2024/10/26~28	SAGA2024 全障スポ	SAGA アリーナ
2024/10/31~11/02	佐賀インターナショナルバルーンフェスタ	佐賀市嘉瀬川河川敷
2024/11/02~04	サガマチ秋遊フェス	松原神社、エスプラッツ
2024/10/23,11/03,04,11,12	B.LEAGUE	SAGA アリーナ
2024/11/09,10	九州理学療法士学術大会	SAGA アリーナ
2024/11/16,17	V.LEAGUE	SAGA アリーナ
2024/11/16,17	佐賀さいこうフェス	佐賀市街地

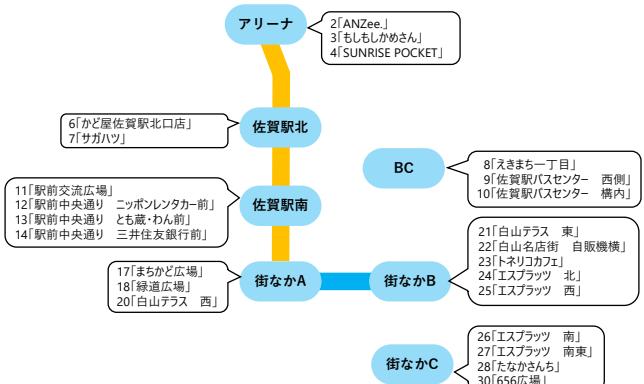


図 10: エリア分け

本可視化は Apple 製品から発信される BLE アドバタイズパケットが Android 端末などから発信されるものと比較して信号が安定しているという特性を踏まえ、Apple 製品から発信される BLE アドバタイズパケットについてのみに着目し、3.2 節で述べた手法を適用して実施した。

3.6.1 国スポ期間休日と平常時休日の比較

国スポ期間休日 (2024 年 10 月 5, 6, 12~14 日) における人流と、平常時として定義した休日 (2024 年 10 月 19, 20 日) における人流を比較した結果を図 11 に示す。図 11 より「9:00~12:00」の時間帯においては佐賀駅北およびバスセンター (BC) からアリーナ方向への人流が顕著に増加していることが確認できる。また、佐賀駅北と佐賀駅南間の人流の増加も観測された。「12:00~15:00」では、佐賀駅北および BC からアリーナ方向の増加に加え、アリーナから佐賀駅北、佐賀駅南、BC への人流も顕著に増加している。また、この時間帯においても佐賀駅北 ⇄ 佐賀駅南間の人流の増加が継続して観測された。「15:00~18:00」の時間帯では佐賀駅北および BC からアリーナ方向への人流の増加傾向が緩やかになる一方で、アリーナから佐賀駅北、佐賀駅南、BC への人流がより顕著に増加した。また、佐賀駅北と佐賀駅南間の人流も引き続き増加していた。

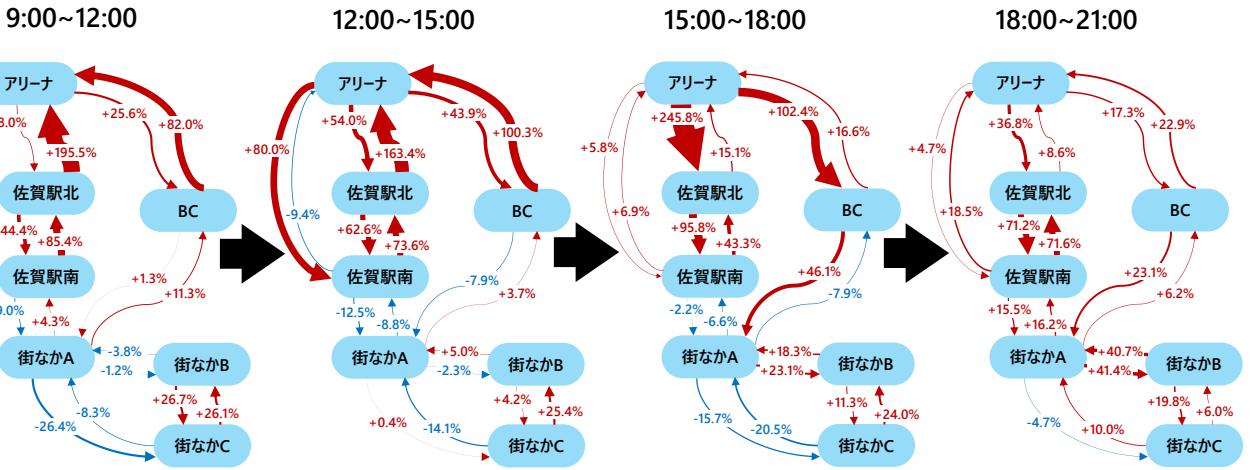


図 11: 平常時休日に対する国スポ期間休日の人流の増減

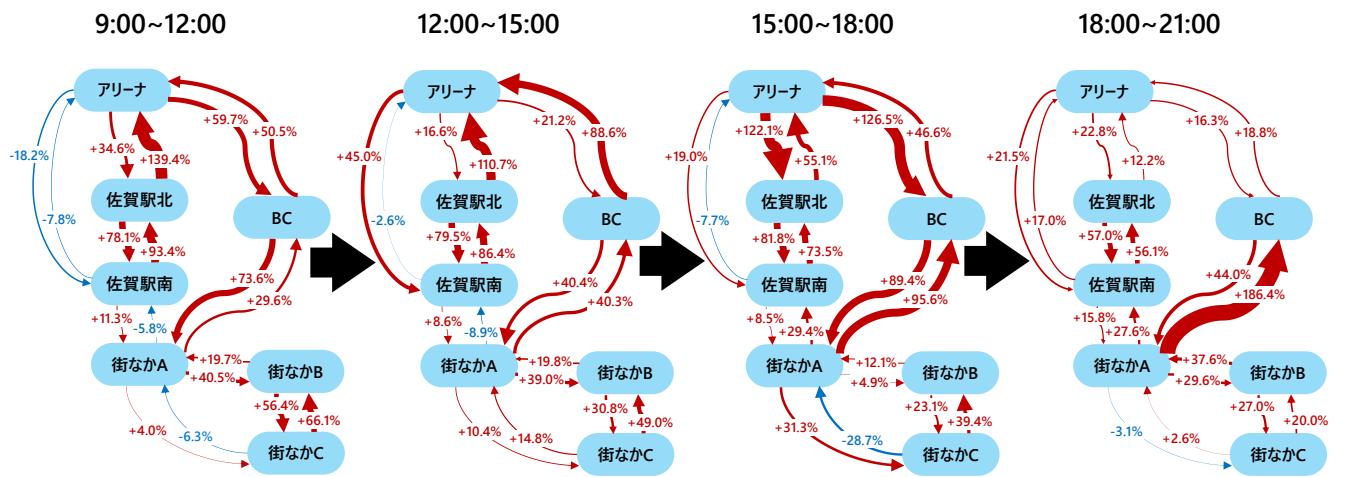


図 12: 平常時休日に対する佐賀さいこうフェス・V.LEAGUE 期間の人流の増減

「18:00~21:00」の時間帯に入るとアリーナと佐賀駅北、佐賀駅南、BC 間の人流は平常時に比べて若干増加する程度になった一方で、街なか A ⇄ 街なか B 間の人流の増加が確認された。この時間帯でも、佐賀駅北 ⇄ 佐賀駅南の人流の増加が続いていた。

なお、国スポ期間中で特に人流の増加が顕著であったのは、開会式が行われた 10 月 5 日である。「12:00~15:00」の BC ⇒ アリーナの人流は他の国スポ期間中の同時間帯の平均と比較して 104.3% の増加が見られた。また、「15:00~18:00」におけるアリーナ ⇒ 佐賀駅北の人流も、他の国スポ期間中の同時間帯の平均に対して 129.6% の増加を示した。

3.6.2 佐賀さいこうフェス・V.LEAGUE 期間と平常時（休日）の比較

佐賀さいこうフェスおよび V.LEAGUE が開催された日（2024 年 11 月 16, 17 日）における人流と、平常時として定義した休日（2024 年 10 月 19, 20 日）の人流を比較した結果を図 12 に示す。図 12 から、「9:00~12:00」の時間帯においては、佐賀駅北および BC とアリーナ間の人流、ならびに BC ⇒ 街なか A の人流が顕著に増加していること

が確認された。加えて、街なか A ⇄ 街なか B 間、街なか B ⇄ 街なか C 間の人流の増加、佐賀駅北 ⇄ 佐賀駅南間の人流の増加も観測された。「12:00~15:00」では佐賀駅北および BC からアリーナ方向への人流が引き続き増加しており、さらにアリーナから佐賀駅北、佐賀駅南、BC への人流も増加している。また、BC ⇒ 街なか A、街なか A ⇄ 街なか B ⇄ 街なか C の人流も活発化しており、佐賀駅北 ⇄ 佐賀駅南間の人流増加も継続していた。「15:00~18:00」の時間帯では、アリーナから佐賀駅北、BC への人流の増加がさらに顕著になったほか、佐賀駅北および BC からアリーナ方向への人流の増加も見られた。加えて、BC ⇄ 街なか A 間の往来、街なか A ⇄ 街なか B、街なか B ⇄ 街なか C の人流も引き続き増加傾向にあった。佐賀駅北 ⇄ 佐賀駅南の人流も一貫して増加していた。「18:00~21:00」では BC ⇄ 街なか A 間の人流が特に活発となり、中でも街なか A ⇒ BC の方向への人流が顕著であった。アリーナと佐賀駅北、佐賀駅南、BC 間の人流も引き続き増加傾向を示したが、その程度は前時間帯と比較してやや穏やかであった。その他、街なか A ⇄ 街なか B ⇄ 街なか C の人流の増加、

佐賀駅北 ⇄ 佐賀駅南間の人流の増加も観測された。

3.6.3 佐賀市からのフィードバック

本実験に対して、佐賀市より以下のようなフィードバックが得られた。SAGA アリーナと佐賀駅を結ぶ南北方向の人流については、イベント開催時に顕著な増加が観測されており、主要目的地とアクセス拠点の関係性に基づく予測と整合的であった。一方で、街なかにおける東西方向の人流に関しては、部分的な分析から一定の人流増加が示唆されたものの、全体として連続的な移動やイベントによる明確な変化を捉えるには至らなかった。また、イベントによる影響をより的確に把握するためには、イベント情報の詳細な収集および、それに基づく特定日への対応が必要であるとの指摘があった。さらに、観測エリアの設定や分析手法の制約により、事前に立てた仮説との比較検証を十分に行うための情報が得られていないという点も課題として挙げられた。

4. おわりに

本稿では、実際に佐賀市において本手法による人流推定を実施した際の知見、失敗事例、ならびに人流の可視化の取り組みについて報告した。60 日間の実験の結果として、BLE データは約 1.4 億レコード得られた。このデータに本研究の手法を適用し推定された経路データの正解経路データに対する網羅率は、移動手段が徒歩の場合は平均 70.9%，自転車で平均 46.2%，全体平均 66.0% となった。本手法の適用前と比較すると、徒歩の場合は 9.5%，自転車の場合は 3.4%，全体では 8.3% の網羅率向上が確認され本手法の有効性が示唆された。また、アドレスの紐付け失敗パターンとしてはスキャナ間の物理的距離に起因する失敗と正解アドレス以外のアドレスと紐付いての失敗が確認された。これらの失敗に対して、スキャナ間の最適な距離を求める方法の考案や、紐付けアルゴリズムの改善により対処することが今後の課題である。さらに人流の可視化をした結果の佐賀市からのフィードバックとして、SAGA アリーナと佐賀駅を結ぶ南北方向の人流増加はイベント開催時において明確に観測され、主要施設とアクセス拠点の関係性に基づく予測と一致していたとの評価が得られた。一方で、街なかにおける東西方向の人流については、全体的な連続的移動やイベントによる変化を十分に捉えるには至らず、より詳細なイベント情報の把握と分析手法の改善が求められる点が課題として挙げられた。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (JP24K20763), JST 共創の場形成支援プログラム (JPMJPF2115)，および SAGA スマート街なかプロジェクト官民連携型実証プロジェクトの助成を受けて行われたものです。実証実験の BLE スキャナの設置を行うにあたり、実験エリア近隣店舗の方々

や公共施設等の方々にご協力いただきました。ここに感謝の意を申し上げます。

参考文献

- [1] 国土交通省. 地域課題解決のための人流データ利活用の手引き. https://www.mlit.go.jp/tochi_fudousan-kensetsugyo/chirikukanjoho/tochi_fudousan-kensetsugyo Tk17_000001_00034.html. Accessed on 16/07/2024.
- [2] Guangcong Wang, Jianhuang Lai, Peigen Huang, and Xiaohua Xie. Spatial-temporal person re-identification. In *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*, Vol. 33, pp. 8933–8940, 2019.
- [3] 高野茂, 高取千佳, 黒瀬武史, 荒川豊. 公共空間の AI カメラによる人流計測とオープンデータ化への取り組み. 第 85 回全国大会講演論文集, 第 2023 卷, pp. 261–262, 2023.
- [4] 永田吉輝, 廣井慧, 米澤拓郎, 河口信夫. 複数の 3D 通過センサによるプライバシーを考慮した人流推定手法. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2168 論文集, 第 2020 卷, pp. 1020–1028, 2020.
- [5] Hirozumi Yamaguchi, Akihito Hiromori, and Teruo Higashino. A Human Tracking and Sensing Platform for Enabling Smart City Applications. In *Proceedings of the Workshop Program of the 19th International Conference on Distributed Computing and Networking, Workshops ICDCN '18*, pp. 1–6, 2018.
- [6] Mathias Versichele, Tijs Neutens, Matthias Delafontaine, and Nico Van de Weghe. The use of Bluetooth for analysing spatiotemporal dynamics of human movement at mass events: A case study of the Ghent Festivities. *Applied Geography*, Vol. 32, No. 2, pp. 208–220, 2012.
- [7] 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. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, 第 2014 卷, pp. 1249–1257, 2014.
- [8] 林虎太朗, 吉村太斗, 謙訪博彦, 松田裕貴. 複数台の ble スキャナを用いた都市人流推定に向けた基礎検討. 2024 年度情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集, No. G-38, pp. 1–8, 2024.
- [9] Jens Weppner and Paul Lukowicz. Bluetooth Based Collaborative Crowd Density Estimation with Mobile Phones. In *2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom'13*, pp. 193–200. ACM, 2013.
- [10] Yuki Matsuda, Kentaro Ueda, Eigo Taya, Hirohiko Suwa, and Keiichi Yasumoto. Blece: Ble-based crowdedness estimation method for restaurants and public facilities. In *The 14th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU '23)*, pp. 1–6, 2023.
- [11] Ippei Goto, Kentaro Ueda, Yuki Matsuda, Hirohiko Suwa, and Keiichi Yasumoto. Bless: Ble based street sensing for people counting and flow direction estimation. In *2024 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom '24)*, pp. 76–81, 2024.
- [12] 秋山周平, 谷口義明. MAC アドレスがランダム化された BLE 機器が移動する場合の同一機器推定手法. マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム 2022 論文集, 第 2022 卷, pp. 1489–1496, 2022.
- [13] デジタル庁. 新型コロナウイルス接触確認アプリ (COCOA). <https://www.digital.go.jp/policies/cocoa/>, 2020. Accessed on 18/08/2024.