

WiFiとBLEによるハイブリッド混雑度計測における 自動パラメータ調整の検討

徳田 瑛¹ 荒川 豊^{1,2} 高野 茂² 石田 繁巳^{3,4}

概要: 近年, コロナウイルスによる影響で密を避ける事が重要視されている. この現状を踏まえ, IoT 技術を生かした混雑度計測の手法として, スマートフォンや PC から発せられる WiFi の Probe Request 数や, 新型コロナウイルス接触確認アプリケーションである COCOA の BLE の検出数を用いて, 混雑度を計測する. しかし, 設置場所の環境や人通りの量によって測定される数値にブレが発生してしまう問題が発生した. そこで, 実際に大学内の食堂に機材を設置し, 測定された数値と設置場所における実際の滞在者を目視でカウントした数値との相関関係を求めた. 本稿では, 測定値と実測値を用いて自動でパラメータ調整を行う手法を検討する.

キーワード: 混雑度計測, WiFi パケットセンサ, COCOA, Exposure Notification, Private MAC

Examination of Automatic Parameter Adjustment in Hybrid Congestion Measurement by WiFi and BLE

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症が世界に広がった影響により, 密を避ける事がより重要視されている. 予防ワクチンや治療薬の摂取も徐々に始まり, 各国で様々な取り組みがなされている中, 我々も自粛生活というものを経験した. 自粛によって第1波は抑制できたものの, 経済に甚大な影響をもたらしており, 現在は with コロナと言われる, 経済活動を止めずにコロナと共存していくアプローチが取られている. その中では我々一人一人が手洗いや手の消毒, マスク着用, 密な場所の回避といった自発的な行動を取ることが求められている.

with コロナに向けて, 九州大学では食堂での混雑が大きな問題になると我々は考えている. 我々が通う九州大学・伊都キャンパスは, 2018年に移転が完了した新しいキャンパスである. その面積は日本最大の272haを誇り, 教職員

と学生を合わせて約2万人^{*1}が在籍している. 多くの学生は大学内に数カ所ある食堂を利用することとなる. コロナウイルス感染症の広がりにより, 密を避ける行動が求められており, 現在も一部の講義はオンラインで実施されているが, 教職員は在宅勤務を組み合わせつつも出勤している状況が続いている. また一部対面講義も再開されており, 大学内での混雑の発生も予想される.

この現状を踏まえ我々は, 昼食の時間帯に食堂が密な場所となることを回避することに着目した. 食堂を利用する学生, 教職員が自主的に時間をずらして利用するように促すためには, 食堂の混雑状況の情報提供が必要不可欠である. IoT 技術を生かした混雑度計測の手法として, スマートフォンや PC から発せられる WiFi の Probe Request 数や, 新型コロナウイルス接触確認アプリケーションである COCOA の BLE の検出数を用いて, 混雑度を計測した. しかし, 設置場所の環境や人通りの量によって測定される数値にブレが発生してしまう問題が発生した. そこで, 実際に大学内の食堂に機材を設置し, 機材で測定された数値と設置場所における実際の滞在者を目視でカウントした実

¹ 九州大学 大学院システム情報科学府/研究院
Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka,
Fukuoka 819-0395, Japan

² 九州大学 持続的共進化地域創成拠点 (COI)

³ 公立はこだて未来大学 システム情報科学部

⁴ 九州大学 システム LSI 研究センター (SLRC)

^{*1} https://www.kyushu-u.ac.jp/f/36714/2019kyudaigaiyou_P25-26_compressed.pdf

表 1 混雑度計測技術の比較表

技術	技術概要	利点	欠点
カメラ	オブジェクト認識により人物や顔を検出して人数カウント	● 高精度	● カメラに映る範囲のみ ● カメラ設置場所の制約 ● GPU 処理が必要
WiFi	プローブ信号をカウント 電波の伝搬状況から推定	● 安価, 実績あり ● 高精度	● 中精度 ● 特殊な送受信機必要
BLE	COCOA (Exposure Notification) から発信される信号をカウント	● iOS に標準搭載	● インストール率不明 & 変化
マイク	騒音を計測	● スマホ非保有者(子供・高齢者等) 対応	● 教室など静かな空間では無意味
CO2	CO2 濃度を計測	● スマホ非保有者(子供・高齢者等) 対応	● 濃度変化にタイムラグ
基地局情報	ドコモモバイル空間統計などスマートフォン の位置情報を利用	● 設置不要	● 認識単位が広い

測値との相関関係を明らかにするとともに、その結果に基づき設置場所に応じて自動的にパラメータを調整するフローについても検討した。

2. 関連研究

コロナ禍により、混雑度情報に対する要望が高まっているが、以前から混雑度を計測する研究は行われている。混雑度の計測は、対象となるエリアのサイズや、屋内か屋外か、あるいは、ユーザ側のセンサを用いるか環境側で計測するか、など種々の条件によって、向き不向きがある。

表 1 は、混雑度技術に利用される様々な技術とその特性、利点、欠点を簡潔にまとめたものである。接触確認アプリ COCOA の普及によって利用可能になった BLE (Bluetooth Low Energy) を除き、ここでは環境側にセンサを設置し、ユーザには何もインストールしたり装着したりする必要が無いものだけを示している。

最も広範で手軽な手法は、スマートフォンが接続されている基地局情報をもとに、その基地局の周りがどれくらい混雑しているかを計測する手法である。各携帯電話事業者によって、サービス化されており、代表例としては、NTT ドコモのモバイル空間統計が挙げられる。基地局への接続状態から混雑度を推定するため、環境側にもユーザ側にも何も追加することなく、全国の混雑状況を把握することが可能である。しかしながら、基地局単位でしか混雑状況がわからないため、250m あるいは 500m メッシュごとの人数となり、バス停や食堂といった小さな単位での混雑度計測は不可能である。

そのような特定の小さなエリアの混雑度を計測する手法としては、カメラを使う方式、WiFi や BLE などの電波を使う方式、音や CO2 といった混雑によって変化する環境情報を観測する方式などが挙げられる。中でも、深層学習の進展およびカメラの高精度化により、海外で多く利用されているものがカメラベースの混雑度計測である。映像か

ら頭部を検出し、人数カウントする手法や製品もあるが、プライバシーに配慮し、カメラ画像をマクロに捉えることで、個人の検出を行うことなく駅などの混雑を計測する手法 [1] も提案されている。我々も、九州大学に最寄り駅である JR 筑肥線・九大学研都市駅 [2] および中洲川端の川端通商店街に、福岡市実証実験フルサポートのもとカメラを設置しており、混雑度の計測 [3-5] や賑わいの計測 [6] を実施してきたが、ドーム型のカメラをバス停の屋根の上部やアーケードの中に設置する際の場所の制約、そして、そこから映る範囲だけしかカウントできないという課題を感じている。

電波を使う方式は、大きく 2 つに分けることができる。1 つは、空間の電波の状況から空間内の遮蔽量を推定する手法、もう 1 つは、スマートフォンから勝手に発信されている電波を観測する手法である。前者の例としては、室内での WiFi の伝搬環境が混雑状況によって変化することに着目し、WiFi 機器を室内に複数台設置することで混雑度を 5 人単位で推定する手法を発表している [7]。しかしながら、この手法は、伝搬状況を観測するために特殊な送受信機を設置する必要があるという課題がある。一方、スマートフォンから発信される電波を観測する手法は、これまで WiFi パケットセンサという呼び名で多くの研究が報告されている [8-12]。特に混雑度という観点では、中田らが学生食堂の混雑度を計測した例 [13] やアドインテ社が AIBeacon*2 という商品も発売している。WiFi パケットセンサは、スマートフォンなどが近隣のアクセスポイントとの接続を確立する際に発信する Probe Request (プローブ要求) 信号を観測し、その数から混雑度を推定している。そのため、ユーザ側にアプリをインストールしてもらうことなく混雑状況を把握できる。しかしながら、WiFi は、タブレットやノートパソコン、店舗内の POS レジ他さまざまな業務システムで利用されていることや、到達距離が

*2 <https://www.aibeacon.jp/>

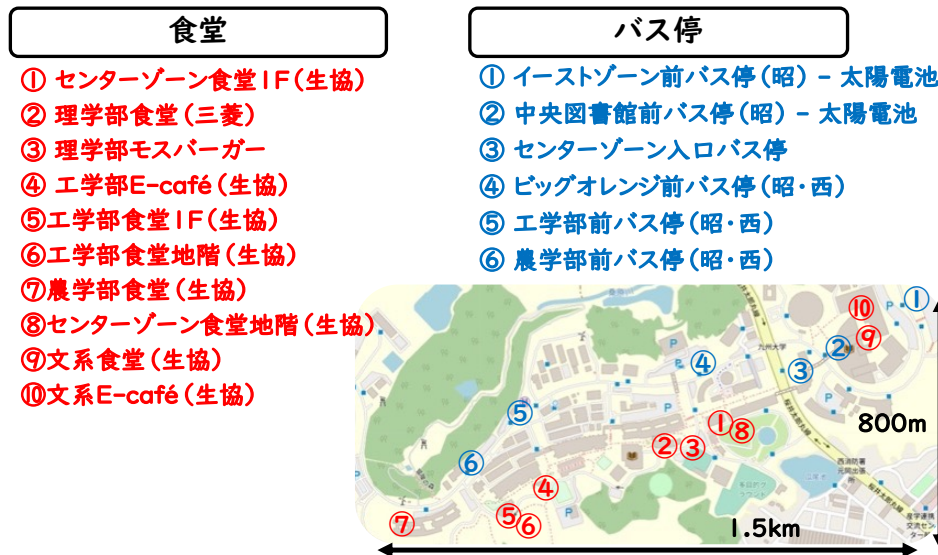


図1 キャンパス内のセンサマップ

広いことから、バス停や店舗など小さな領域の混雑度を計測する際はオーバーカウントしてしまう傾向がある。そこで、我々はコロナ禍に伴って開発された接触確認アプリCOCOAに着目している。新型コロナウイルス接触確認アプリCOVID-19 Contact-Confirming Application^{*3}であるCOCOAは、接触確認のために、スマートフォンから定期的に特定のヘッダを持つBLE信号Exposure Notificationを発信している。そのため、この信号を観測することで、その場にあるスマートフォンの台数を把握できると考えている。ただし、COCOAのインストール率は100%ではないため、少なめに見積もってしまう可能性が高い。その他、マイクを使う手法やCO2センサーを使う手法なども考えられるが、前者は会話が発生しない状況(バス待ちや電車の中ではそれほど会話しなない)では計測できない。また、後者は、バス停など開放空間では計測できないこと、また、閉空間においても、反応にタイムラグが生じることが報告されている[14]。

本研究では、伊都キャンパス内のバス停や食堂での混雑度計測を対象としている。また、混雑度情報は、利便性の観点から、何人という絶対的な数値ではなく、キャパシティや平常状態に対してどの程度混雑しているかという相対的な数値で提供したいと考えている。現在、センサとしては、上記比較に基づき、WiFiとBLE(COCOA)が有望であると考え、現在伊都キャンパス内の全バス停および食堂にセンサを取り付けてある。

しかしながら、設置場所によって、空間の大きさや周辺の状況が異なり、1つのしきい値等で相対的な混雑度を算出するのは困難であることがわかった。そこで、本稿では、センサを設置したあとに、設置環境に応じて、自動的に相

対的な混雑度を算出するためのパラメータを調整するアルゴリズムについて検討した。

3. ハイブリッド混雑度計測手法について

提案システムでは、スマートフォンなどが近隣のアクセスポイントとの接続を確立する際に発信するWiFiのProbe Request信号と、COCOAをインストールしたスマートフォンから発信されるExposure Notification信号を観測し、それらの数値から混雑度を推定している。

3.1 PMACのフィルタリング

WiFiのProbe Request信号のカウントでは、観測パケット数を、1分毎に、MACアドレスを重複なくカウントしているが、従来のWiFiパケットセンサでは考慮されていなかった点として、MACアドレスのランダム化を考慮している。過去に、端末固有のMACアドレスを収集し、行動をトラッキングする企業が相次いだため、プライバシー対策として、最新のスマートフォン(iOS14以降、Android10以降)ではMACアドレスがランダム化されるようになっている。このアドレスは、Private MAC(通称、PMAC)と呼ばれ、明確な定義や更新頻度は公表されていないが、1台の端末から複数のMACアドレスを持つパケットが発信されることから、従来のWiFiパケットセンサでは実際の端末数よりも多いと判断してしまう。

実際に、混雑時間帯における1分間に検知されるProbe Request信号のうち、90%以上がPMACである。逆に、深夜帯などはPMACはほとんど検知されない。そのため、本研究では、PMAC特有のアドレスフォーマットに基づいて、PMACを除去してカウントしている。

^{*3} https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/cocoa_00138.html

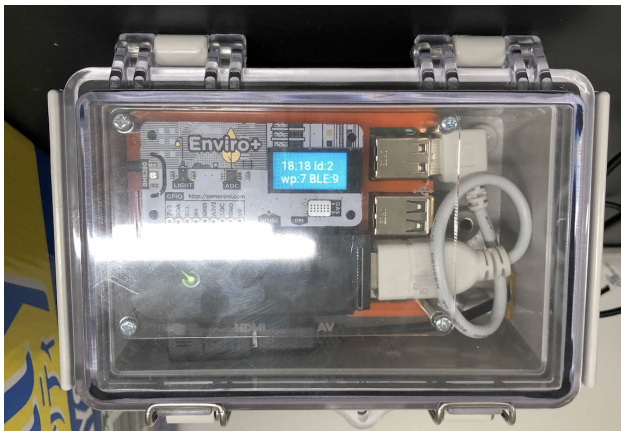


図 2 設置した混雑度センサ

3.2 システム構成

提案システムは、図 1 に示された場所に取り付けられたセンサ端末と、情報を集約し混雑度を計算するクラウドシステム、そして、情報を可視化するモバイルサイトから構成されている。図 2 に実際に設置した混雑度センサを示す。混雑度センサは、Raspberry Pi 3 をベースとして、環境センサボード Enviro+^{*4} と、外付けの USB WiFi モジュール、USB LTE アダプタを接続している。外付けの USB WiFi モジュールとオンボードの BLE をモニタモードで動作させ、周辺のパケットをキャプチャする。PMAC のフィルタリングや 1 分毎の数値化はセンサ端末内で行われ、その数字が LTE 回線を通じて、クラウドシステムに送信される。端末のプログラムは、Python を用いたスクリプトとして動作しており、電源が入ると自動起動するように設定されている。Enviro+ の液晶モニターには、1 分ごとに実際の測定値が表示され、動作確認が行えるようになっている。

クラウドシステムでは、各端末から送られてきた 1 分ごとの WiFi Probe Request 数および Exposure Notification 数を元に、10 分ごとに混雑度の推定を行う。図 3 と図 4 は管理者用のセンサ監視画面である。横軸が時間で、縦軸に 1 分ごとの受信数が表示されるようになっている。

3.3 混雑度について

提案システムは、混雑度を 3 段階で定義している。この理由は、設置環境によっては、対象とする場所のサイズが大きく異なっていたり、周辺に同様の場所が隣接していたりするためである。例えば、受信パケット数が 30 人相当だった場合、20 席のカフェテリアにとっては混雑と言えるが、200 席の生協食堂では空いていると言える。また、今回設置した②理学部食堂と③モスバーガーは隣接しており、重複カウントしてしまう可能性がある。④E-cafe も真上に教室があり、講義の受講生の電波をカウントしてしま

^{*4} <https://shop.pimoroni.com/products/enviro?variant=31155658489939>



図 3 小規模店舗の Wifi Probe Request 数と COCOA(BLE) 数

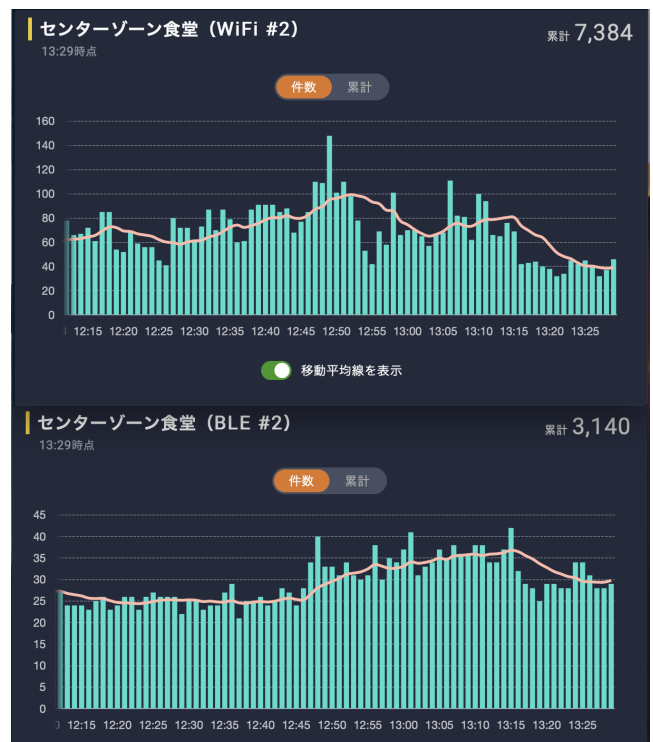


図 4 大規模店舗の Wifi Probe Request 数と COCOA(BLE) 数

う可能性もある。そのため、設置場所に応じて、自動的にパラメータを調整し、常に同じ 3 段階で示される方が利用者にとって理解しやすいと考えたからである。

3.4 パラメータ調整に向けた実測

そのパラメータ調整について検討するため、今回、センサ

表 2 小規模店舗の WiFi Probe Request 数と BLE 数

時刻	WiFi Probe Request				BLE (Exposure Notification)				真値
	All	RSSI>-80	RSSI>-70	RSSI>-60	All	RSSI>-80	RSSI>-70	RSSI>-60	
11:00	10.1	10.1	7.7	2.5	8.4	1.9	0.4	0.3	5
11:10	10.9	10.9	7.7	1.7	9.5	1.5	0.1	0	5
11:20	9.8	9.8	7.5	1.8	10.5	2.5	1	0	6
11:30	18.8	18.8	15.8	2.7	13.4	2.8	0.7	0	6
11:40	23.9	23.9	20.3	9	17.1	5.5	2.4	1.4	8
11:50	27.4	27.4	23.5	12.5	16.7	5.5	2.9	1.8	15
12:00	41	41	36.1	13	27.1	11.6	3.7	2.3	11
12:10	38.1	38	32.9	9.3	39.3	10.4	3	2	10
12:20	36.1	36	29.6	8.7	49.8	12.6	7	1.3	15
12:30	53.3	53.3	48.4	27	53.7	19.3	9.6	3.3	23
12:40	36.3	36.2	30.9	14.1	42.5	19.8	8.5	1.5	22
12:50	26.8	26.7	24.1	10.5	36.1	15.9	6	1.3	13
13:00	34.5	34.4	29.9	10	29.3	10	3.5	1.4	12
13:10	31.4	31.3	25.9	7.3	31.2	9	2	0	7
13:20	19.5	19.5	16.6	4	24.7	8.1	1.8	0	7
13:30	18.3	18.3	15.1	4.8	18.9	7.9	2.6	0.8	8
13:40	16.8	16.8	13.5	4.4	15.4	5.4	2.9	1.6	8
13:50	13.5	13.3	11.5	4	15.1	4.8	2.8	2.1	7
14:00	9.7	9.7	7.1	1	8.6	3	1.3	0.2	5

表 3 大規模店舗の WiFi Probe Request 数と BLE 数

時刻	WiFi Probe Request				BLE (Exposure Notification)				真値
	All	RSSI>-80	RSSI>-70	RSSI>-60	All	RSSI>-80	RSSI>-70	RSSI>-60	
11:00	18.7	17.8	12.9	6.2	5.9	3.5	2.4	0.8	17
11:10	21	20	13.2	6	7.7	5.7	2.6	0.8	22
11:20	26	25	16.3	7	10.6	8.6	4.2	1.4	24
11:30	27.8	26.7	17.8	7.3	14.7	12.6	5.1	1.1	33
11:40	46.9	45.9	33.1	13.3	15.4	13.3	7.6	2.4	46
11:50	51.2	49.9	34.4	13.5	21.7	17.9	9.6	2.5	53
12:00	55.4	54.2	39.6	14.4	26.2	22.2	12.9	2.5	66
12:10	72.1	71.2	54.9	19.2	25.1	21.9	10.8	4	78
12:20	60.2	59.8	50.2	19.9	25.2	18.8	11.3	2.7	87
12:30	75.7	74.5	60.5	22.1	24.8	20.1	11.1	2.1	84
12:40	95.2	93.3	73.5	23.2	28.9	25.6	16	3.4	81
12:50	77.6	77.2	67.2	26.3	32.7	29.6	18.2	5	85
13:00	73.3	73	64.4	22.9	35.8	34.4	22.3	4	94
13:10	63.9	63.9	55.5	20.2	33.7	31.9	20.8	4	86
13:20	39.1	38.7	32.5	13.6	29.8	27.2	18.2	4.8	68
13:30	30.5	29.7	23.8	9.7	22.9	20.1	12.5	2.9	47
13:40	25.4	24.6	18.4	8.4	20.1	17	12	2.8	40
13:50	25.7	24.9	20.5	9.6	14	11.8	9.1	1.8	26
14:00	31.3	30.4	22.3	8.2	13.4	10.9	8.1	1.9	33

を用いたデータの計測と同時に、実際に食堂に滞在している人数を目視で数え、実測値として記録した。表 2, 表 3 は、ある 1 日に測定された実測値とセンサによる測定データを示したものである。それぞれの値は 10 分間における平均値である。受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) の部分は、それぞれ電波強度に -60, -70, -80 でしきい値を取りそれ以上の強度の電波のみをカウントし

た場合の数値を記録している。表 4 にこの数値と実測値との間との相関係数の数値を示す。センサの測定値と実測値には強い相関があることがわかった。

3.5 実測に基づき顕在化した課題

しかし、センサで測定した値と実測値を比較していく中で、問題点も見つかった。食堂の利用者がスマートフォン

表 4 測定値と実測値の相関係数

店舗	WiFi Probe Request				BLE (Exposure Notification)			
	All	RSSI>-80	RSSI>-70	RSSI>-60	All	RSSI>-80	RSSI>-70	RSSI>-60
小規模店舗	0.8091	0.8090	0.8131	0.8962	0.8122	0.8786	0.9408	0.6999
大規模店舗	0.9054	0.9114	0.9374	0.9482	0.9325	0.8964	0.8286	0.7883

と PC を所持している場合は WiFi の probe 数が 2 回カウントされてしまう可能性があった。またセンサを設置した場所の付近にある WiFi を使用する別のデバイスから発信された電波も取得してしまうため、取得した数値をそのまま混雑度の値として使用するのには難しいと考えられた。

また、BLE の電波に関しても、アプリをインストールしていない人はカウントされず、正しい人数がカウントできているかどうか疑問符が付いてしまう部分もあった。食堂の店舗の規模で見ると、最大収容人数が多い大型の食堂では、センサから遠い位置の利用者のデバイスからの電波を感知できず実測値よりも少なめの数値が出るが多かったのに対し、小規模の店舗では店外を通行する学生のデバイスから出る電波まで拾ってしまい、実測値よりも大きめの数値が出るが多かった。

いずれの場合にも、1 分間の測定中に利用者のデバイスから必ず電波が発信されるには限らないため、利用者全てを数えきるといったことは難しいと考えられる。

3.6 解決案

この問題を解決するための解決策を検討する。まず、センサを設置した場所付近の、WiFi を使用する別のデバイスから発信された電波については、長期スパンで取得され続けている同一の MAC アドレスをブラックリストに追加し、以降はカウントしないようにする事で混雑度推定に用いるデータへの影響を無くすることができる。

また、店舗の規模によって測定値に増減が出てしまう点に関しては、広い店舗ではセンサの台数を増やしてカウントする、狭い店舗では電波の強度にしきい値を設け、通行人から発せられていると推測される弱い電波はカウントしないといった対策法が考えられる。さらに、通行人対策としては、10 分間など一定の時間を区切り、その時間内で複数回同じ MAC アドレスからの電波を確認した場合のみカウントするという対策法も考えられる。

電波の強度以外にも、1 分間で検知された回数が一度だけの場合は通行人や退出した人とみなしカウントしないようにするといった解決策も考えられる。

3.7 自動パラメータ調整フロー

図 5 に解決策を踏まえた上でのアルゴリズムのフローチャートを示す。

最初に設置する店舗の収容可能人数 X を取得する。これは店舗に応じて与えるものとする。次に、電波強度しきい

値 Z を設定し、これを超えた強度の電波のみをカウントするものとする。初期値は表 2、表 3 において最小のしきい値として用いた $Z=-80$ を置いた。

WiFi の電波を取得し、これに対し数時間にわたって同じ MAC アドレスから取得され続けているかどうかを見て、取得され続けている MAC アドレスに関しては設置場所付近に定常的に設置されているデバイスからの電波だと判断し、ブラックリストに登録して除外処理を行う。次に、電波強度しきい値 Z と比較してこれ以下の強度であればカウントしないという処理を行う。さらに、通行人対策として、1 回観測しただけではカウントせず、2 回以上観測した場合にカウントする処理を行う。重複してカウントする事を防ぐため、逆に 3 回目以降はカウントしないという処理を行う。

BLE のアルゴリズムでは、設置場所付近に定常的に設置されているデバイスから COCOA の電波は発信されていないと判断し、ブラックリストの部分削除した。また、BLE は WiFi に比べより頻繁に電波を発信しているため、WiFi と同じ検知回数 2 回以上でしきい値を取っても通行人の数はカット出来ないと思われるため、10 回以上である場合にカウントする。

これらの処理を 1 分間行い、加算されたカウント数 Y を記録する。このカウント数 Y と店舗収容可能人数 X とを比較する事で混雑度を求める。電波で数えた数字 Y はブラックリスト処理と通行人除外処理を行なっているため、表 2、表 3 に示した実数カウントの場合と比べるとまた別の結果になるとは思われるが、そこからどうやってさらに実際の利用者数の数字に近づけていくかの方法は検討中である。ここで、座席数 X より測定値 Y が大きい値になった場合は、しきい値 Z の設定が間違っていたと判断し、これも表に準拠して Z が $+10$ されるよう処理を行う。

最大席数 X に対して測定値 Y が 80% を超える場合は混雑していると判断し、逆に 30% に満たない場合は空いていると判断する。もしそれらのどちらにも該当しない場合は中とした。これを WiFi の probe request 数と BLE 数のそれぞれの数値から判断し、どちらか一方でも 80% を超えていれば混雑していると判断し、30% を超えていれば中とし、30% に満たない場合は空いていると判断する。

2 種類のデータから総合的に判断する事により混雑度推定精度の向上を図った。

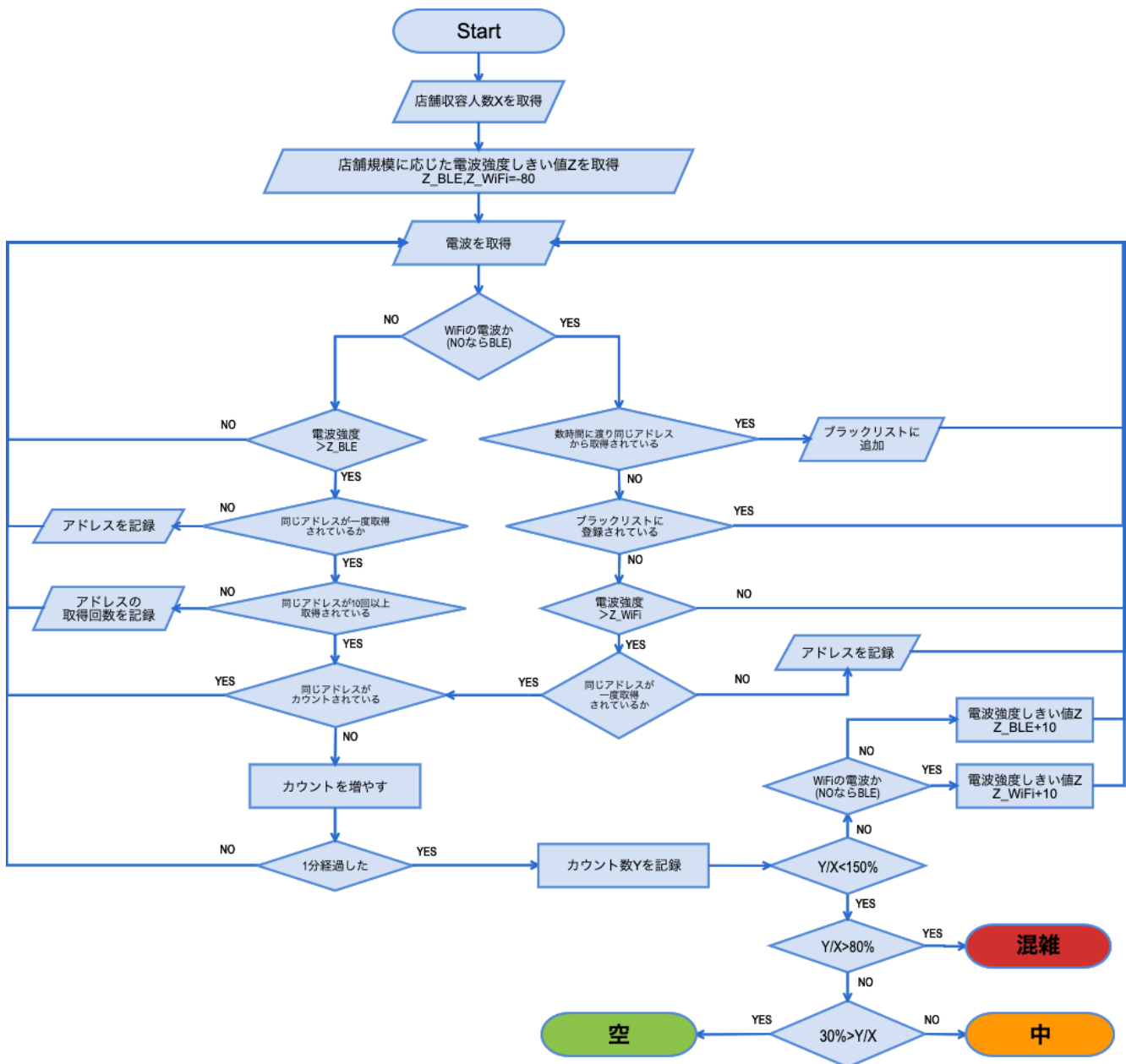


図 5 自動パラメータ調整のフローチャート

4. 今後の展望

実際に人数を数えた値とセンサで取得した値との間には高い相関係数が見られ、このセンサの値から混雑度推定が行えることが確認できた。今後は、センサの値から自動で人数を推定できるようにし、この人数と設置場所の収容人数とを比較することで、混雑度として簡単に可視化していきたいと考えている。大学内の食堂の場合であれば、混雑度情報を学生が簡単に閲覧できるようにしたい。これにより、混雑している際には時間をずらすよう提案したり、他の食堂を利用するよう呼びかけるなどの形での活用法が考えられる。

5. おわりに

九州大学では一部対面講義が解禁されて学生の通学が再開されており、食堂の利用者数のさらなる増加が予想される。今後は、さらに混雑度推定の制度の向上を行い、学生の利用者からも簡単に混雑状況を確認できるようにしていきたい。

謝辞 本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構のセンター・オブ・イノベーション (COI) プログラム、JPMJCE1318 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 新井啓之, 伊藤直己, 谷口行信: 群衆をマクロにとらえる画像処理技術~人物・群衆の幾何モデルに基づいた人数推定とその応用~, 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), Vol. 2014, No. 13, pp. 1-8 (2014).
- [2] Shigeru Takano, Maiya Hori, Y. A. R.-i. T.: Towards ICT based mobility support system with in the COVID-19 era, *The 18th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2020)* (2020).
- [3] 高橋 遼, 林 健太, 光来出優大, 二俣雅紀, 井上隼英, 松尾周汰, 石田繁巳, 荒川 豊, 高野 茂: バス停混雑度可視化システム itocon (いとこん), 第 28 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2020) (2020).
- [4] Ryo Takahashi, Kenta Hayashi, Y. M. M. F. S. I. S. M. S. I. Y. A. S. T.: Itocon - A System for Visualizing the Congestion of Bus Stops around Ito Campus in Real-time, *The 18th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2020)* (2020).
- [5] 井上隼英, 高橋 遼, 林 健太, 光来出優大, 二俣雅紀, 松尾周汰, 石田繁巳, 荒川 豊, 高野 茂: [依頼講演] itocon : 複数の混雑度センサを用いたバス停混雑度可視化システム, 電子情報通信学会センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会 (SeMI) (2020).
- [6] Abdelwahab, M. A., Kaji, S., Hori, M., Takano, S., Arakawa, Y. and Taniguchi, R. I.: Measuring “Nigiwai” From Pedestrian Movement, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 24859-24871 (2021).
- [7] 松本大生, 高橋 遼, 石田繁巳, 荒川 豊: 無線 LAN を用いたデバイスフリー室内混雑度推定の初期評価, 第 82 回全国大会講演論文集, Vol. 2020, No. 1, pp. 247-248 (2020).
- [8] 上善恒雄, 三神山駿, 辻本悠佑, 望月祐洋, 西尾信彦, 西田純二: 交通流動センシングのための Wi-Fi パケットセンサの開発と性能実験, 土木学会第 49 回土木計画学研究発表会春大会, No. 49 (2014).
- [9] 望月祐洋, 上善恒雄, 西田純二, 中野秀男, 西尾信彦ほか: Wi-Fi パケットセンサを利用した匿名人流解析システムの構築, 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), Vol. 2014, No. 45, pp. 1-8 (2014).
- [10] 森本哲郎, 辻本悠佑, 白浜勝太, 上善恒雄: Wi-fi パケットセンサを用いた人流解析と可視化, *DEIM Forum* (2015).
- [11] 一井啓介, 寺部慎太郎, 柳沼秀樹, 康楠, 田中皓介: Wi-Fi パケットセンサを用いた散策型観光地における観光回遊行動の把握, 土木計画学研究・講演集, Vol. 57, pp. 01-16 (2018).
- [12] Shimada, A., Oka, K., Igarashi, M. and Taniguchi, R.-I.: Congestion analysis across locations based on wi-fi signal sensing, *6th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM 2017)*, pp. 204-221 (2018).
- [13] 中田恵史, 岡本 東, 堀川三好: 無線 LAN におけるプロンプト要求を用いた混雑度推定, マルチメディア通信と分散処理 (DPS), Vol. 2018, No. 1, pp. 1-7 (2018).
- [14] 湯山映里, 森野博章: 赤外線・二酸化炭素センサによる車両混雑度推定システムの基礎検討, 電子情報通信学会東京支部学生会, Vol. 53 (2009).