

RSSIを用いた混雑度推定システムに関する検討

松本 直也¹ 川崎 慈英¹ 鈴木 誠² 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要: 本稿では, センサネットワークが展開された空間における人数や無線通信デバイスの数などの混雑度をセンサノードで取得可能な RSSI から推定するシステムを提案する. まず, 同時送信型ワイヤレスセンサネットワークプラットフォーム「Choco」を用いて RSSI を同期サンプリングすることで, ある瞬間の端末間 RSSI と周辺 RSSI の 2 つを同期サンプリングによって取得・収集する仕組みを実現した. また, 収集した端末間 RSSI から空間の人数, 周辺 RSSI から無線通信デバイス数を推定するためのアルゴリズムを提案する. 大阪大学の研究室において評価を行った結果, 研究室に人がいる・いないに関しては約 92%, 人数に関しては ± 2 人の誤差で約 79% の確率で推定できることが分かった.

キーワード: 混雑度推定, RSSI, 同期サンプリング, センサネットワーク, ワイヤレスセンシング

1. はじめに

スマートフォンや IoT デバイスの登場によって電波を用いたトラフィックが膨大に増え続けている [1]. 筆者らは, 通信に使用している電波を利用して空間やユーザの情報をセンシングするワイヤレスセンシングに取り組んでいる. ワイヤレスセンシングが実現されることで, 通信システムとセンシングシステムを統合的に扱うことができる.

本稿では, 電波を用いて混雑度を推定することを考える. 本稿における混雑度推定とは, 空間内に存在するユーザの数や無線通信デバイスの数を推定することと定義する. 混雑度の推定が実現されることで, スマートビルディングにおけるエネルギー削減, 大型のショッピングモールにおける混雑度に応じたナビゲーション, 閉館時間における施設の侵入検知, 独居老人向けの見守りサービスなどの日常生活における状況依存型のサービスや, 無線通信プロトコルにおけるデバイス数に応じたパラメータ調整など多くの活用が見込まれる.

日常での利用を考えた場合, 混雑度推定では, 1. ユーザがデバイスを持たなくて良いこと, 2. 導入のコストが低いことの 2 点が求められる. 混雑度推定を行う手法として, 既に電波を用いたものやカメラを用いたものなど様々な手法が検討されている [2–13]. しかしながら, 上記の 1. ユーザがデバイスを持たなくてよいこと, 2. 導入のコストが低いことの全ての要件を満たす方法は現在のところ存在しない. 混雑度推定の詳細に関しては 2 節で議論する.

このような観点から, 本稿では, 時刻同期を行った複数

の IEEE 802.15.4 端末を用いて取得した RSSI (Received Signal Strength Indication) を利用した混雑度推定手法を提案する. まず, 端末間 RSSI と周辺の RSSI の厳密に時刻同期が取れた 2 種類の RSSI を取得する仕組みを同時送信型ワイヤレスセンサネットワークプラットフォーム「Choco」上に実装した. 既に IEEE 802.15.4 を用いたセンサネットワークシステムが導入された環境であれば, ソフトウェアの変更だけで提案手法による混雑度推定を行うことができる. また, 混雑度の推定手法として端末間 RSSI を用いて空間の人数を推定する手法を, 周辺の RSSI を用いてデバイス数を推定する手法を実現した. 研究室で行った実験において, 提案手法を用いることで 2 人までの誤差なら 79% の確率で推定できることが確認できた.

本稿の構成は以下の通りである. 2 節において混雑度推定の要件と既存の手法について整理する. 3 節では, 提案手法の全体像を述べ, 4 節でデータ収集する仕組みを, 5 節でデータ収集した結果を処理する方法を示す. 5 節では, 提案システムの評価としてデータ収集率や混雑度の推定結果について述べ, 最後に 6 節でまとめとする.

2. 空間の混雑度推定

2.1 混雑度推定における要件

本稿では, 混雑度推定とは, ユーザが空間に何人存在するか, 無線通信デバイスが空間に何個存在するかを推定する技術であると定義する. 混雑度推定が可能になることで, 日常において様々なアプリケーションが可能となる. 例えば, スマートビルディングでは, 混雑度に応じて空調などを調整することでエネルギーの消費を削減することができる [14]. 大型のショッピングモールの各店舗では,

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² ソナス株式会社

店舗が混んでいるかどうかを推定できれば、待ち時間の削減や店舗の配置最適化などを実現できる。通信プロトコルでは、空間に存在する無線通信デバイス数が分かれば初期バックオフ値の調整など通信性能の向上に役立てることができる。本稿のように、混雑度推定を「空間に存在する人数を推定する技術」ととらえると、高齢者の見守りサービスや施設への侵入検知などのアプリケーションへの応用も考えられる。

混雑度推定を考えた場合、

- ユーザがデバイスを持たなくてよいこと
- 展開コストが低いこと

の2つが求められる。日常での利用を考えた場合、ユーザの負担を考えるとデバイスフリーであることが望ましい。ユーザが特定の機器を持たなければならない場合、端末のバッテリー切れや故障が問題となる。また、展開コストとは、ある空間に混雑度推定技術を導入する際の金銭的・心理的コストが低いことを意味している。混雑度推定を導入したい空間にできるだけ安く簡単にシステムを導入できることが望ましい。さらに、混雑度推定はユーザが存在する空間に導入されるため、プライバシーの侵害は低ければ低いほどユーザの心理的コストも低くなる。

2.2 既存の混雑度推定手法

混雑度推定の手法としては、全てのユーザの位置情報を収集して混雑度を推定する手法と、空間情報から直接混雑度を求める手法が存在する。全てのユーザの位置情報を収集して混雑度を推定する手法では、位置推定の技術が利用される。電波を用いてユーザの位置情報を得るための位置推定手法としては、GPS、Wi-Fi、Bluetoothなどを使った手法が存在する[2-7]。例えば文献[5]では、発信された電波の飛行時間を用いて位置推定を行っている。しかしながら、GPS、Wi-Fi、Bluetoothを用いた多数のユーザの位置推定はデバイスフリーではない。各ユーザが位置検出を行うためにそれぞれの無線規格に対応したデバイスを持たなければならないという制約がある。

空間情報から直接混雑度を求める手法として、カメラや赤外線、電波を用いた手法が存在する。デバイスフリーな手法としてカメラや赤外線などを用いた手法が研究されている[8-11]。例えば文献[10]では、カメラ内の視覚情報から抽出された特徴に基づいて人数を決定することで混雑度の推定を行っている。しかしながら、カメラや赤外線は指向性の強い光を使っているが故に取得できる範囲が視野角に制限されるという問題がある。また、障害物によって取得範囲が制限されるシャドウイングも問題となる。これらの取得範囲の制限はセンサの設置場所の制約となる。また、プライバシー、カメラ単体の金銭的コスト、画像処理を行うための計算量的コストも問題となる。

デバイスフリーな手法としては、電波を用いる方法も研

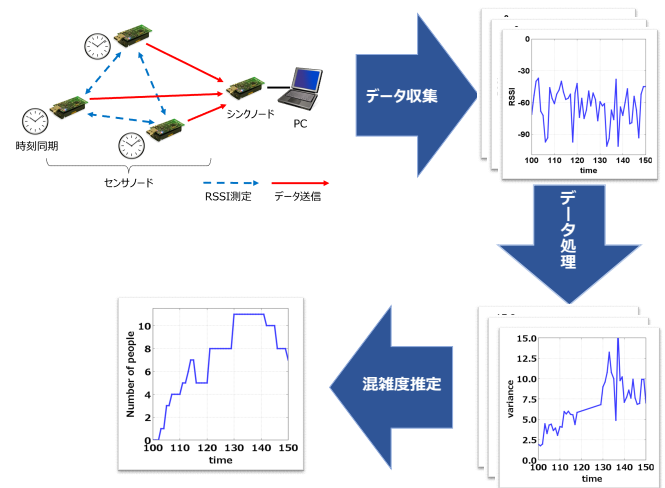


図1 混雑度推定システムの全体像

究されている[15-17]。例えば文献[16]では、空間に設置した2台の端末間で取得する受信電波強度から混雑度を推定する仕組みを提案している。しかしながら、文献[16]の手法では、事前測定を行う必要があり、事前測定を行った環境でしか推定ができないといった問題が生じる。

3. 提案システム全体像

混雑度推定における課題に対して、筆者らは、既に展開されているワイヤレスセンサネットワークに統合的に追加できる仕組みを実現する。具体的には、IEEE 802.15.4[18]を用いたワイヤレスセンサネットワークを対象とする。既存のIEEE 802.15.4を用いたワイヤレスセンサネットワークで取得可能なRSSIのみを用いて空間の状態をセンシングすることで、デバイスフリーかつ導入が容易な仕組みを提供する。構造ヘルスマモニタリング、環境モニタリング、スマートメーターなど既にIEEE 802.15.4を用いて展開されている様々なアプリケーションと統合しながら展開することを想定している。

図1に提案する混雑度推定システムの全体像を示す。各センサノードでは、IEEE 802.15.4端末において同期サンプリングを用いて各時刻の端末間RSSIの分散を評価することで混雑度推定を行う。同期サンプリングを行うことで、センサが取得したある瞬間のRSSIの比較が可能となるため、ある瞬間の空間全体の電波状況がわかる。IEEE 802.15.4を用いたRSSIの同期サンプリングの仕組みについては4.2で詳細に述べる。

RSSI同期サンプリングで収集したRSSIはシンクノードに送られた後にPC上でデータ処理されて混雑度推定が行われる。混雑度推定される対象となるユーザは特定のデバイスを持つ必要がない。また、RSSIの情報のみを利用するのでカメラなどの映像と比べてプライバシーの問題もない。RSSIを用いた混雑度推定に関しては5で詳細に述べる。

4. RSSI 同期サンプリングシステム

RSSI 同期サンプリングシステムでは、センサネットワークが展開されている空間において各センサノードが同期しながら

- 端末間 RSSI
- 周辺 RSSI

の 2 種類の RSSI を取得する。

端末間 RSSI とは、あるセンサノードが信号を発信している時に、別のセンサノードがその信号を受信した時の RSSI を意味している。センサノード間に人がいる場合やマルチパスの変動によって RSSI が変動するため、空間の変化を捉えることができる。他のセンサノードから送信された無変調の正弦波を受信した時の電波の強さを RSSI として計測する。人の平均の歩行速度は秒速約 1.25 メートル、人の横幅の平均は約 30 センチメートルであるため、センサ端末間で電波が直進していると考えた場合、サンプリング間隔を 240 ミリ秒以内にすれば人が通ったことによる影響が RSSI として表れる。センサ端末間を通過しなかったとしても、電波は反射、屈折、回折、散乱して進むため、RSSI の変化として表れる場合がある。

周辺 RSSI は、あるセンサノードで計測できる周辺の電波の強さを RSSI として取得したものである。同じワイヤレスセンサネットワークに属するセンサノードが通信していない時に RSSI を取得する。無線 LAN や Bluetooth などその場に存在する無線通信デバイスの通信状況を捉えることができる。

4.1 同時送信型フラッディング

提案システムでは、同時送信型ワイヤレスセンサネットワークプラットフォーム「Choco」[19,20] を用いることで、端末間 RSSI や周辺 RSSI を取得する際に全てのセンサノードで同期して RSSI のサンプリングを行っている。RSSI の取得を同期することで、その空間におけるある瞬間の状態を RSSI で切り取ることが可能となる。Choco では、同時送信型フラッディング [19,20] を用いることでセンサノード間の厳密な時刻同期と高ロバストで低消費電力なデータ収集を実現している。

同時送信型フラッディングとは、単一の経路を使用してパケットの伝搬を行うのではなく、全てのノードが転送を行うことで、宛先ノードへとパケットを伝搬するデータ配送方式である。図 2 に同時送信型フラッディングの動作例を示す。赤丸が送信を行うノード、黒丸が受信を行うノードを表す。最初に送信機がパケットを送信する。送信機以外のノードは、パケットを受信すると、バックオフなどの遅延を挟むことなく即座に転送する。各ノードが受信後転送を繰り返すことで、ネットワーク全体へパケットが伝搬される。全てのノードが転送するため、一部のノードが

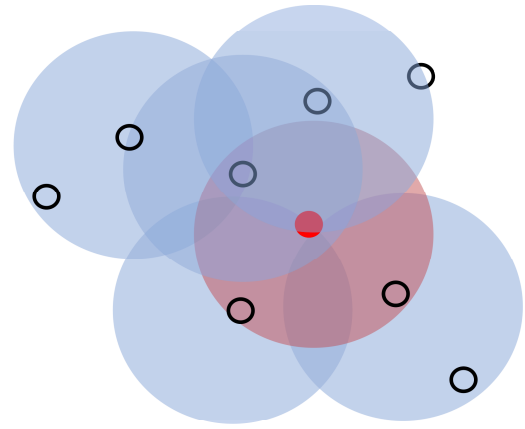


図 2 同時送信型フラッディング

通信できなくなった場合でも、他の経路を使用して、宛先ノードへとパケットを伝搬することができる。

また、Choco では、時分割スロットを用いたパケット送信指定を行うことで、省電力性も実現している。時分割スロットを用いたパケット送信指定とは、時分割されたスロットを用いて「どのスロットの」、「どのシーケンス番号で」、「どのノードが」、「どのデータを」送信するのかをシンクノードが各ノードに対し指定することである。指定されたノードは指定されたパケットを送信する。バックログは、各ノードの送信バッファ内のパケット数を参照する。シンクノードは、データパケットのヘッダーからバックログを計算し、スロットを各ノードに割り当てる。全てのノードのバックログがゼロである時、シンクノードはスリープパケットを送信することによって、全てのノードにスリープモードに入るように指示する。パケットが「どのスロットの」、「どのシーケンス番号で」送信されるかが分かることで、受信端末の待機時間を削減することができる。

4.2 同期サンプリング

同時送信型フラッディングは、同期サンプリングにも利用している。提案する混雑度推定手法では、1 秒ごとにシンクノードが各センサノードに対して同時送信型フラッディングを用いて同期パケットを通知することで 1μ 秒の精度で時刻同期を行っている。

提案システムでは、複数のセンサノードで同時刻の RSSI を取得するために同期サンプリングを行う。同期サンプリングとは、各センサノードで内部時刻を同期してサンプリングを行うことである。同期サンプリングを行うことで、各センサノードが取得した RSSI の比較において時間整合性が保たれる。

各センサノードでは、200 ミリ秒ごとに端末間 RSSI と周辺 RSSI を交互に同期サンプリングで取得する。図 3 に同期サンプリングの動作例を示す。提案システムでは、50 ミリ秒を 1 スロット、4 スロット分である 200 ミリ秒を 1 周期となっている。各スロットは 15 ミリ秒の Choco 期間

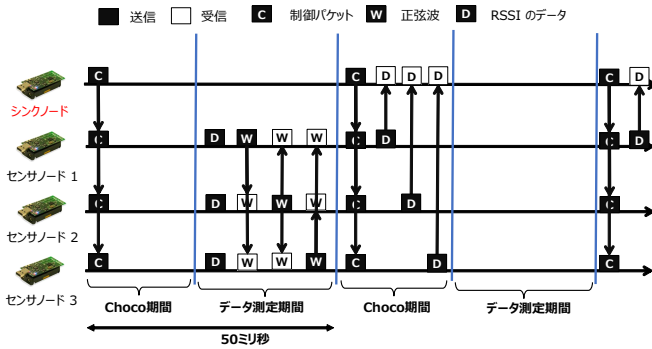


図 3 同期サンプリングの動作例

と 35 ミリ秒のデータ測定期間に分けられる。Choco 期間ではシンクノードは制御パケットの送信とデータの収集を行う。データ測定期間では各センサノードが端末間 RSSI と周辺 RSSI を測定する。

各スロットでは一番最初に、シンクノードから制御パケットが同時送信型フラッディングを用いて全てのセンサノードに対して配送される。制御パケットには「どのスロットの」「どのシーケンス番号で」「どのノードが」「どのデータを」「送信する/計測する」かが指定されている。同時送信型フラッディングによってもたらされる時刻同期と高信頼なフラッディングを用いてシンクノードが厳密にセンサノードの挙動を管理することでノードの待機時間を削減して電力効率を向上している。

各センサノードは各サンプリング周期の最初の 1 スロット内のデータ測定期間で端末間 RSSI と周辺 RSSI を測定する。各センサノードは周辺 RSSI として全ノードがパケットを送信せず RSSI を測定する。測定を行ったセンサノードは得られた周辺 RSSI のデータをバッファに保存する。次に、各センサノードは端末間 RSSI を測定するために、順番に無変調の正弦波をブロードキャストする。正弦波を受信したセンサノードは送信元ノードの ID と端末間 RSSI のデータをバッファに保存する。送信元ノードの ID は制御パケットによるスケジューリングに従って送信時刻から判断される。各センサノードはバッファに保存されている周辺 RSSI のデータと端末間 RSSI のデータを同時送信型フラッディングを用いてシンクノードに送信する。以上の動作を繰り返すことで RSSI の測定とデータの送信を行う。

残りの 3 スロット内の Choco 期間においてシンクノードに対してデータを送信する。制御パケットを受信したセンサノードは、制御パケットの指定に従って、送信バッファに保存されている周辺 RSSI と端末間 RSSI のデータをシンクノードに対して送信する。残りの 3 スロット内のデータ測定期間では各ノードはスリープモードとなる。

5. RSSI を用いた混雑度推定手法

4 節に示した RSSI 同期サンプリングシステムで取得で

きる端末間 RSSI を用いた人数推定手法と、周辺 RSSI を用いたデバイス数推定手法を実現した。

5.1 人数推定手法

Algorithm 1 人数推定

```

1: for  $x$  in  $\mathbb{S}$  do
2:   for  $y$  in  $\mathbb{S}$  do
3:      $\sigma_{\text{sum}}^2 \leftarrow \sigma_{\text{sum}}^2 + V(x, y, T)$ 
4:   end for
5: end for
6:  $\overline{\sigma^2} \leftarrow \frac{\sigma_{\text{sum}}^2}{|\mathbb{S}|^2}$ 
7: if  $\overline{\sigma^2} \leq \gamma$  then
8:    $u = 0$ 
9: else
10:   $u \leftarrow \lfloor \alpha \times \overline{\sigma^2} + \beta + 0.5 \rfloor$ 
11: end if

```

表 1 Algorithm1 で使われる変数

変数名	アルゴリズム中での役割
\mathbb{S}	センサノードの集合
$V(x, y, T)$	センサノード x と y における端末間 RSSI の分散
σ_{sum}^2	全端末間 RSSI の分散
$\overline{\sigma^2}$	全端末間 RSSI の分散の平均

4.2 節に示した RSSI 同期サンプリングシステムを用いて収集した端末間 RSSI を用いることでワイヤレスセンサネットワークが展開されている空間の人数推定を行う仕組みを実現した。具体的には、端末間 RSSI の分散を用いる。端末間 RSSI は人の移動の他に温度や湿度などによって変化するため、収集した端末間 RSSI をそのまま混雑度と結びつけて評価することは難しい。ユーザの通過による端末間の RSSI の変化は瞬間に大きく変動する。一方で、端末間の RSSI の温度や湿度による変化は緩やかであるため、分散を取ることによって環境変動による端末間 RSSI の変化の影響を小さくすることができる。また、4.2 節に示した同期サンプリングを利用することで、ユーザが移動したのか、それとも複数ユーザが存在するかを区別することができる。

Algorithm1 に人数推定アルゴリズムを、表 1 に Algorithm1 で用いる変数を示す。 \mathbb{S} はセンサノードの集合、 σ_{sum}^2 、 $\overline{\sigma^2}$ は計算用の変数、 u は推定された混雑度を表す。 $V(x, y, T)$ はセンサノード x, y 間における過去 T 秒間の端末間 RSSI の分散を計算する関数である。

Algorithm1 の 1 行目から 6 行目では端末間 RSSI の分散を計算している。端末間 RSSI の分散を計算では、パスごとの端末間 RSSI の分散を求めた後に、全てのパスの分散の平均を算出する。Algorithm1 の 7 行目から 9 行目では人が在室中かどうかの判定を行っている。端末間 RSSI の分散が一定の閾値 γ 以下の場合は人がいないと判断して混雑度 u に 0 を代入する。端末間 RSSI の分散が γ 以上の

表 2 Algorithm2 で使われる変数

変数名	アルゴリズム中での役割
\mathbb{S}	センサノードの集合
$D(x, t)$	ノード x の周辺 RSSI
$\min(D(\mathbb{S}, t))$	周辺 RSSI の最小値
$\text{xmeans}(N(\mathbb{S}, \mathbb{T}))$	総クラスタ数

場合は混雑度 u に $\alpha \times \overline{\sigma^2} + \beta$ の四捨五入した値を代入する。定数 γ は実験データから算出する。定数 α, β は端末間 RSSI の分散のデータと実際の在室人数のデータを用いて最小二乗法で算出する。

5.2 デバイス数推定

4.2 節に示した RSSI 同期サンプリングシステムを用いて収集した場の RSSI を用いることで空間における無線通信デバイス数推定を行う仕組みを実現した。具体的には、周辺 RSSI からクラスタリングを用いてデバイス数を推定する。空間内にワイヤレスセンサネットワーク以外に稼働している無線通信デバイスが通信を行う時、デバイスの近くにあるセンサノードが取得する周辺 RSSI の値が上昇する。Wi-Fi 環境において 1 パケットの送受信に要する最小時間は約 20μ 秒である。本稿におけるセンサノードのサンプリング間隔は 200 ミリ秒であるので、稼働デバイスによる周辺 RSSI の上昇は確率的に表れる。稼働デバイスが存在する場合でも、周辺 RSSI の上昇が測定できない時もあるため、収集した周辺 RSSI をそのままデバイス数と結びつけて評価することは難しい。稼働デバイスが 1 台の時、周辺 RSSI の値は、パケットを測定した場合と測定できなかった場合の 2 つの傾向に分けられる。稼働デバイス数が多いほど、各センサで観測される周辺 RSSI の値は多くの傾向を持つため、空間における電波状況も多くの傾向が観測される。空間における電波状況の傾向毎に分けるため、クラスタリングを行い傾向の総数を求めることでデバイス数を推定する。

クラスタリング手法では X-means 法を用いる。X-means 法とは分けるクラスタの総数を自動的に決定しながらクラスタリングする手法である [21]。X-means 法の動作としては

- (1) 各クラスタ毎にクラスタを 2 つに分割。
- (2) 各クラスタ毎に分割する前の BIC (Bayesian Information Criterion) よりも小さくなった場合分割、それ以外なら分割しない。

を繰り返すことで、最適なクラスタ数を決定しながらクラスタリングを行う。

Algorithm 2 に T 秒毎のデバイス数推定アルゴリズムを、表 1 に Algorithm 2 で用いる変数を示す。

\mathbb{S} はセンサノードの集合、 \mathbb{T} は測定される時間の集合、 γ と ϵ と λ は計算用の変数、 $D(\mathbb{S}, t)$ は t 秒において各センサノード

Algorithm 2

```

1: for  $x$  in  $\mathbb{S}$  do
2:    $D_{\text{sum}}(t) \leftarrow D_{\text{sum}}(t) + D(x, t)$ 
3: end for
4:  $\overline{D_{\text{sum}}(t)} \leftarrow \frac{D_{\text{sum}}(t)}{|\mathbb{S}|^2}$ 
5: if  $\overline{D_{\text{sum}}(\mathbb{S}, t)} > \gamma$  then
6:    $\epsilon \leftarrow \min(D(\mathbb{S}, t))$ 
7:   for  $x$  in  $\mathbb{S}$  do
8:      $N(x, t) \leftarrow D(x, t) - \epsilon$ 
9:   end for
10: end if
11:  $\theta \leftarrow \lambda \cdot \text{xmeans}(N(\mathbb{S}, \mathbb{T}))$ 

```

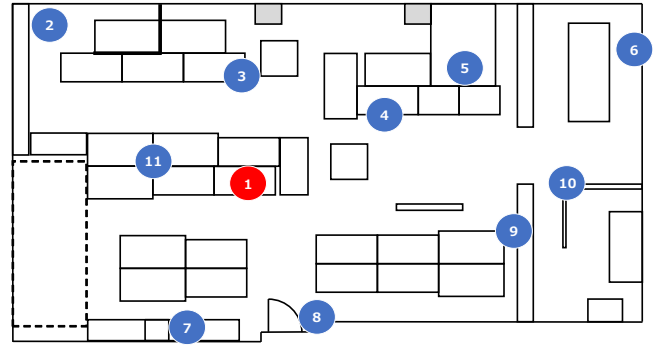


図 4 センサノード・シンクノードの設置位置

ドで取得される周辺 RSSI、 $\overline{D(\mathbb{S}, t)}$ は t 秒における空間全体の周辺 RSSI の平均、 $N(\mathbb{S}, t)$ は正規化された周辺 RSSI、 θ は推定されるデバイス数を表す。 $\min(D(\mathbb{S}, t))$ は t 秒における周辺 RSSI の最小値を計算する関数、 $\text{xmeans}(N(\mathbb{S}, \mathbb{T}))$ は、 T 秒間の測定における正規化されたデータをクラスタリングすることで、総クラスタ数を計算する関数を表す。

Algorithm 2 の 5 行目では、空間全体の周辺 RSSI の平均が閾値 γ 以下の場合、データを棄却することでノイズの除去を行う。稼働デバイスによる周辺 RSSI への影響がない時、取得できる空間全体の周辺 RSSI の値は小さくなるため、閾値以下のデータはノイズとみなせる。Algorithm 2 の 8 行目では、周辺 RSSI の傾向ごとにクラスタリングするためにデータの正規化を行う。空間における全体の電波状況の傾向が同じでも、ベースとなる電波の強さが異なると同じクラスタに分類されないため、ある時刻における最小の周辺 RSSI の値を減算を行うことでベースの値を統一する。Algorithm 2 の 11 行目では、X-means 法によるクラスタリングを行い、得られた総クラスタ数からデバイス数の推定を行う。定数 γ は実験データから算出する。定数 λ は電波暗室で実験を行い得られた総クラスタ数と稼働デバイス数を比較することで算出する。

6. 評価

6.1 実験環境

RSSI のデータと在室人数のデータ収集を目的として、2017 年 11 月 28 日の 10 時から 12 月 1 日の 10 時まで、

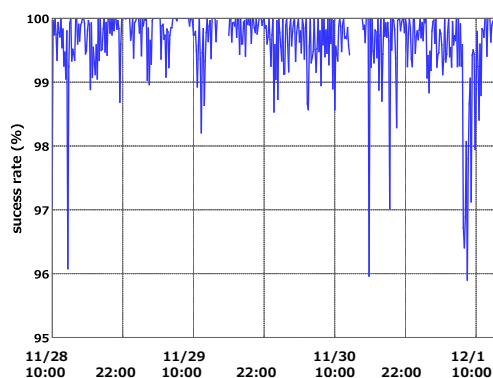


図 5 データ収集の成功率

大阪大学大学院情報科学研究科 6F の研究室内で実験を行った。端末間 RSSI のデータ収集のためにシンクノード 1 台とセンサノード 10 台を研究室内に設置した。シンクノードには Sonas 社の CC-RM01, センサノードには Texas Instruments 社の CC2650MODA に基づいた Choco 評価ボードを用いる。アクセスポイントとして Buffalo 社の WZR-1750DHP2 を用いる。このアクセスポイントは、研究所にネットワークアクセスを提供するために使用される。無線チャネルは 13ch (2.472GHz) に設定されている。図 4 にノードの設置場所を示す。図 4 の 1 にシンクノード, 2 から 11 にセンサノードを設置した。11 月 28 日の 15 時 00 分から 16 時 30 分まで研究室ミーティングがあった。研究室ミーティングは別室で行われるため、研究室内の人が急激に減る。

6.2 データ収集の成功率

図 5 に実験におけるデータの収集率を示す。平均成功率は 99.6% であった。横軸が 28 日の 10 時から 12 月 1 日の 10 時までの時刻、縦軸が全体のデータ収集の成功率を表す。どの時間帯もデータの収集率は 95% を超えている。11 月 28 日の 15 時から 16 時 30 分までの間はミーティングの資料のダウンロードのため周辺 RSSI の値が高くなったが、データの収集率に顕著な影響は見られない。

6.3 人数推定手法の評価

図 6 に端末間 RSSI の分散と実際の在室人数のグラフを示す。横軸が 28 日の 10 時から 12 月 1 日の 10 時までの時間、左側の縦軸が全体の端末間 RSSI の分散、右側の縦軸が在室人数を表す。図 6 から 2 つのことがわかる。1 つ目は人がいるときに分散が大きくなり、人がいない時に分散が小さくなるということである。11 月 28 日の 10 時から研究室に人が入室するにつれて分散が大きくなっていることが確認できる。また、研究室ミーティングが行われた 15 時から 16 時 30 分において、研究室内の人数が減っているため、分散の値が下がっていることが確認できる。研究室内にいる人数と端末間 RSSI の分散の相関係数は約 0.71 と

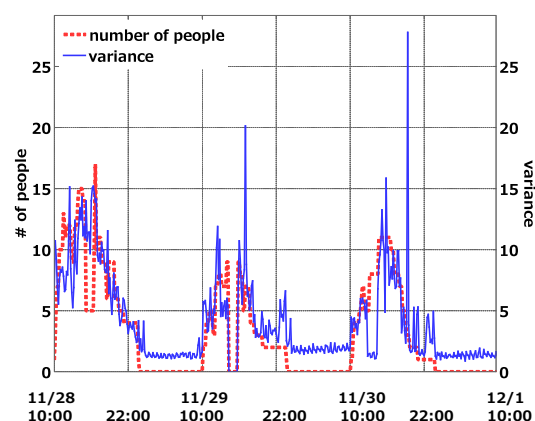


図 6 端末間 RSSI の全体の分散と実際の在室人数の時間変化

なることから、端末間 RSSI と在室人数には相関があることが確認できる。2 つ目は 11 月 28 日の 15 時から 16 時 30 分までの間は在室人数に対して、分散の値が大きいということである。この時周辺 RSSI の値が他の時間に比べて大きかったため、端末間 RSSI が Wi-Fi などの電波の影響を受けていると考えられる。

次に、実験により得た端末間 RSSI と実際の在室人数のデータを用いて混雑度推定手法の評価を行った。Algorithm1 における α , β の値を $\alpha = 0.83$, $\beta = 0.65$ とした。推定人数に幅を持たせることを目的として、実際の在室人数が $u - \delta$ と $u + \delta$ の間に存在するかどうかを δ の値を変化させて評価した。

推定手法の有用性を評価するために、実験によって取得した端末間 RSSI の分散と実際に空間内にいた人数との相関を Algorithm1 における T の値を 600 に固定して評価した。図 7 に実際の在室人数と推定した人数とのグラフを示す。横軸が 28 日の 10 時 00 分から 12 月 1 日の 10 時 00 分までの時間、左側の縦軸が推定人数、右側の縦軸が在室人数である。図 7 より、以下の 3 つのことが分かる。1 つ目は、実際の在室人数と推定人数を比べた結果、人の有無の判定については、約 92% の確率で正しい推定ができていることである。人の有無については、人がいる時に誤判定が発生しやすい傾向にあった。具体的には、人がいる時に判定される確率は 87%, 人がいる時にいないと判定される確率は 13%, 人がいない時にいないと判定される確率は 97%, 人がいない時にいると判定される確率は 3% であった。2 つ目は、混雑度推定については $\delta = 0$ の時に約 56% の確率で、 $\delta = 2$ の時に約 79% の確率で正しい推定ができていたことである。混雑度については、分散の値が大きい場合に推定誤りが発生しやすい傾向にあった。この誤りの発生しやすさは、在室人数の増加に伴って人の移動が多くなり、端末間 RSSI の分散の値が予想より大きくなることに起因している。

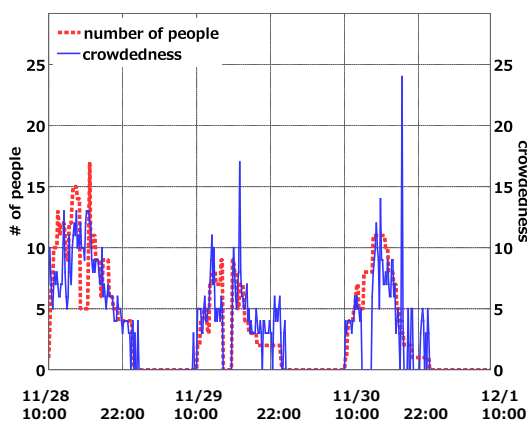


図 7 推定人数と実際の在室人数の時間変化

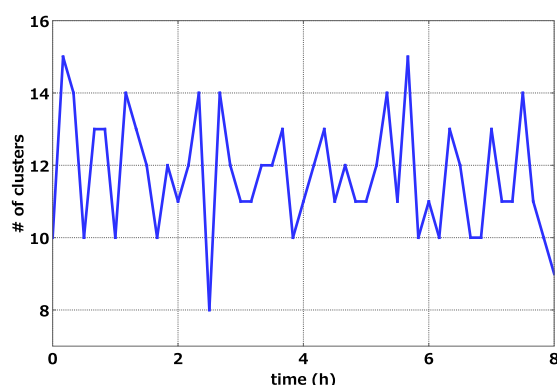


図 8 1 台の PC から電波を飛ばした時の総クラスタ数の時間変化

6.4 デバイス数推定手法の評価

5.2 節に示したアルゴリズムの有効性を評価するために、電波暗室において PC 3 台を設置して実験を行った。PC は 3 台とも Ubuntu 16.04 LTS がインストールされた Panasonic 社の CF-B11QWABR を用いた。電波暗室にネットワークアクセスを提供するために有線接続された PC をホットスポット化することでアクセスポイントとした。無線チャンネルは 1ch (2.412GHz) に設定した。実験はネットワーク計測ツールである iperf を使って、設置した片方の PC からもう片方の PC に約 10Mbps で電波の送信を行った。電波暗室内では外からの電波は遮断されるため、センサが取得する周辺 RSSI は 2 台の PC が出している電波にのみ影響を受ける。電波暗室での稼働デバイス数が変わらないため、ある一定の時間においてセンサが取得する電波状況の傾向は一定数になるはずである。

図 8 に電波暗室で収集した周辺 RSSI のデータを 10 分毎に X-means 法を用いて計算した総クラスタ数の時間変動のグラフを示す。横軸が計測からの時間、縦軸が X-means 法で求めた総クラスタ数を表す。稼働デバイス数が 2 台で変わらないのに対し、総クラスタ数は 10 から 15 の間でばらついていて、一定の値を示していないことがわかる。

X-means 法で総クラスタ数が多いことの原因を調べるために、センサノードの周辺 RSSI の時系列データを調べ

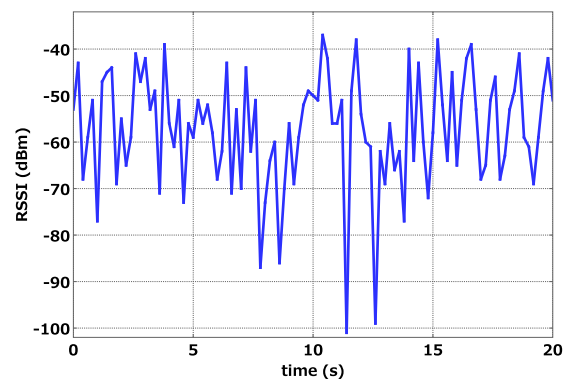


図 9 IEEE 802.15.4 を具備したセンサが取得した周辺 RSSI の時間変化

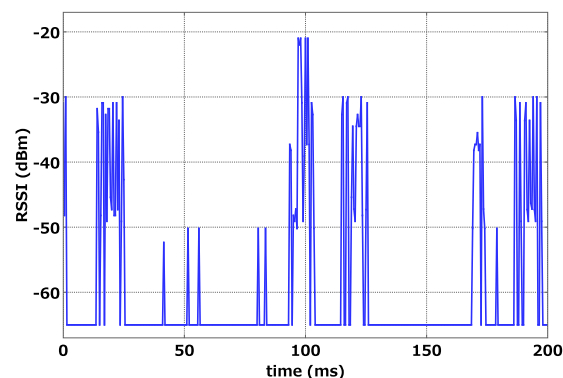


図 10 パワーセンサが取得した周辺 RSSI の時間変化

た。図 9 にあるセンサノードで取得した周辺 RSSI の時系列データを示す。横軸が計測からの時間、縦軸が 1 つのセンサが取得した周辺 RSSI の値である。図 9 では、 -90 dBm 以下の値が電波が出ていない状況であると考えられる。図 9 では、電波が出ている時でも -60 dBm を中心に ± 10 dBm 程度ばらつきがあることが確認できる。

周辺 RSSI のばらつきは、センサノードのチップにおいて RSSI を計測する際に 128μ 秒の平均を算出しているからだと考えられる。IEEE 802.15.4 において RSSI は CCA (Clear Channel Assessment) に用いるため、瞬時値ではなくある一定期間の平均を算出していることが多い。周辺 RSSI のばらつきが一定期間の平均を取っているからかどうかを検証するために、瞬時値を取得できるパワーセンサを使って周辺 RSSI を計測した。

図 10 にパワーセンサで取得した RSSI のデータを示す。横軸が計測からの時間、縦軸がパワーセンサが取得した周辺 RSSI の値である。図 10 より、RSSI の値が -65 dBm, -50 dBm, -30 dBm の 3 つの値に分かれていることが確認できる。今回用いたパワーセンサは -65 dBm より小さい RSSI は測れないため、 -65 dBm の値を示している場合は電波が出ていない状況であると考えられる。また、 -50 dBm の時は数が少ないことから、ビーコンや ACK を送信している受信側の PC、 -30 dBm の時は数が多いことから

送信側の PC の電波であると考えられる。

7. おわりに

本稿では、センサネットワークが展開された空間における人数や無線通信デバイスの数などの混雑度をセンサノードで取得可能な RSSI から推定するシステムを提案した。同時送信型ワイヤレスセンサネットワークプラットフォーム「Choco」を用いてある瞬間の端末間 RSSI と周辺 RSSI の 2 種類の RSSI を同期サンプリングによって取得・収集する仕組みを実現した。また、収集した端末間 RSSI から空間の人数、周辺 RSSI から無線通信デバイス数を推定するためのアルゴリズムを提案・評価した。空間内の人数の推定に関しては端末間 RSSI を用いて推定できることが確認された。空間内のデバイス数の推定に関しては RSSI の取得方法から考え直す必要があることが分かった。現在、人数推定手法およびデバイス数推定手法の改良に取り組んでいる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 (JP16H01718, JP17KT0042), NTT アクセスサービスシステム研究所の支援の下で行った。

参考文献

- [1] H28 総務省情報白書：増加する IoT デバイス, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/html/nc133100.html>(Access:2018/2/15).
- [2] Misra, P. and Enge, P.: Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance Second Edition, *Massachusetts: Ganga-Jamuna Press* (2006).
- [3] Blanke, U., Troster, G., Franke, T. and Lukowicz, P.: Proceedings of Capturing crowd dynamics at large scale events using participatory gps-localization, in *Proceedings of the 2014 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP'14)*, IEEE, pp. 1–7 (2014).
- [4] Biswas, J. and Veloso, M.: Wifi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots, in *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA'10)*, IEEE, pp. 4379–4384 (2010).
- [5] Vasisht, D., Kumar, S. and Katabi, D.: Decimeter-Level Localization with a Single WiFi Access Point., in *Proceedings of the 2016 Networked Systems Design and Implementation (NSDI'16)*, pp. 165–178 (2016).
- [6] Weppner, J. and Lukowicz, P.: Bluetooth based collaborative crowd density estimation with mobile phones, in *Proceedings of the 2013 Pervasive computing and communications (PerCom'13)*, IEEE, pp. 193–200 (2013).
- [7] Chen, L., Kuusniemi, H., Chen, Y., Liu, J., Pei, L., Ruotsalainen, L. and Chen, R.: Constraint Kalman filter for indoor bluetooth localization, in *Proceedings of the 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO'15)*, IEEE, pp. 1915–1919 (2015).
- [8] Lin, S.-F., Chen, J.-Y. and Chao, H.-X.: Estimation of Number of People in Crowded Scenes Using Perspective Transformation, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, Vol. 31, No. 6, pp. 645–654 (2001).
- [9] Yuan, Y., Qiu, C., Xi, W. and Zhao, J.: in *Proceedings of Crowd density estimation using wireless sensor networks, in Proceedings of the 2011 International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN'11)*, IEEE, pp. 138–145 (2011).
- [10] Tang, N. C., Lin, Y.-Y., Weng, M.-F. and Liao, H.-Y. M.: Cross-Camera Knowledge Transfer for Multiview People Counting, *IEEE Transactions on image processing*, Vol. 24, pp. 80–93 (2015).
- [11] Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P. and Liu, J.: Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol. 37, No. 6, pp. 1067–1080 (2007).
- [12] Wang, X., Gao, L., Mao, S. and Pandey, S.: CSI-based Fingerprinting for Indoor Localization: A Deep Learning Approach, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, pp. 763–776 (2017).
- [13] Ohara, K., Maekawa, T., Kishino, Y., Shirai, Y. and Naya, F.: Transferring positioning model for device-free passive indoor localization, in *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, ACM, pp. 885–896 (2015).
- [14] Agarwal, Y., Balaji, B., Gupta, R., Lyles, J., Wei, M. and Weng, T.: Occupancy-driven energy management for smart building automation, in *Proceedings of the 2nd ACM workshop on embedded sensing systems for energy-efficiency in building*, ACM, pp. 1–6 (2010).
- [15] Di Domenico, S., De Sanctis, M., Cianca, E. and Bianchi, G.: A trained-once crowd counting method using differential wifi channel state information, in *Proceedings of the 3rd International on Workshop on Physical Analytics*, ACM, pp. 37–42 (2016).
- [16] Depatla, S. and Mostofi, Y.: Crowd Counting Through Walls Using WiFi, *arXiv preprint arXiv:1711.05837* (2017).
- [17] Depatla, S., Muralidharan, A. and Mostofi, Y.: Occupancy estimation using only WiFi power measurements, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 33, No. 7, pp. 1381–1393 (2015).
- [18] Group, I. . W. et al.: IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), *IEEE Std*, Vol. 802, pp. 4–2011 (2011).
- [19] 鈴木 誠, 長山智則, 大原壮太郎, 森川博之: 同時送信型フラッドングを利用した構造モニタリング, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. 100, No. 12, pp. 952–960 (2017).
- [20] Suzuki, M., Liao, C.-H., Ohara, S., Jinno, K. and Morikawa, H.: Wireless-Transparent Sensing, in *Proceedings of the 2017 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks(EWSN'17)*, Junction Publishing, pp. 66–77 (2017).
- [21] Pelleg, D., Moore, A. W. et al.: X-means: Extending k-means with Efficient Estimation of the Number of Clusters., in *Proceedings of the 2000 International Conference on Machine Learning (Icml'00)*, pp. 727–734 (2000).