

Wi-Fi 受信電波強度の変化を利用した 通路の歩行者数推定手法

倉 聖美^{1,a)} 白石 陽^{1,b)} 山口 弘純^{2,c)}

受付日 2017年5月10日, 採録日 2017年11月7日

概要: 近年, ショッピングモールやビルなどの屋内施設における人数推定を行う研究がさかんに行われている。なかでも通路の歩行者数を把握できれば, たとえばベビーカーや大きな荷物を持つ歩行者に混雑していない通路情報を提供でき, 施設内全体の人流把握などにも役立つと考えられる。これまでに, Wi-Fi 送受信機の組を用いて比較的容易に取得できる電波強度の変動を検出し, 人数推定を行う手法が提案されているが, 既存手法のほとんどは, 比較的歩行速度の遅いオフィス空間の居住者や滞留者を対象としており, 送受信機間を短時間で通過する歩行者の人数を推定する状況を対象としていない。そこで本論文では, Wi-Fi 受信電波強度の変化を利用した通路の歩行者数推定手法を提案する。提案手法では Wi-Fi アクセスポイント (Wi-Fi AP) などの送信機とそれに接続する PC やスマートフォンなどの受信機が通路の両側に配置された環境を想定し, その送受信機間を通過する人数を推定する。電波強度の変動特徴を減衰量や分散で表現したデータを用い, 機械学習により検出器を構成する。サンプリングレートの低い受信電波強度を前提とし, 市販の Wi-Fi AP や既設の送信機を用いる際の可用性を示すため, 大学施設内の通路に送受信機の組を様々な相対位置関係をなすように配置し, 送受信機の相対位置が精度に与える影響の評価を行った。その結果, 送受信機の組を通路方向に対して直角に配置するよりも斜角をなすように配置したほうが高精度に人数推定を行えることが示された。また, 施設内の複数箇所において人数推定を行う場合の可用性を示すため, 複数の計測場所における評価を行った結果, F-measure がおおよそ 0.9 以上と高精度に人数推定を行えることが示された。

キーワード: 屋内人数推定, Wi-Fi 電波強度, 通路

A Method for Counting Pedestrians in Walkway Using Wi-Fi RSSI Measurements

SATOMI KURA^{1,a)} YOH SHIRAISHI^{1,b)} HIROZUMI YAMAGUCHI^{2,c)}

Received: May 10, 2017, Accepted: November 7, 2017

Abstract: Recently, the researches on counting pedestrians in indoor environments such as office buildings and shopping malls have actively been carried out. The number of pedestrians' information on walkways will be useful for those with big baggage to find uncrowded walkways and for facility administrators to grasp people flow. The existing researches on counting pedestrians existing between Wi-Fi transmitter and receiver using Wi-Fi RSSI measurements target those with relatively low mobility in office space. This paper proposes a method for counting pedestrians on a walkway with Wi-Fi RSSI measurement. This study installs Wi-Fi routers as transmitters and PCs or smartphones as receivers on both sides of each walkway, and estimates the number of pedestrians passing through the measurement area between the transmitter and receiver. This study focuses on the fluctuation in Wi-Fi RSSI measurements seen by pedestrians passing between the transmitter and receiver, and generates a detector using feature values that are related to attenuation and variance of the Wi-Fi RSSI information. Finally, two experiments for evaluating the estimation accuracy were conducted in the different arrangements of a transmitter and a receiver and at the different measurement area. The experimental results indicate that the proposed method can estimate the number of pedestrians at high accuracy in the environment that a pair of transmitter and receiver is set slanting to the walkway.

Keywords: indoor pedestrians counting, Wi-Fi RSSI measurements, walkway

1. はじめに

近年、ショッピングモールやビルなどの屋内施設における人数推定に関する研究がさかんに行われている [1]. 人の存在情報は混雑把握や人流推定に活用でき、混雑に応じた空調管理を行う BEMS (Building Energy Management System) のような次世代ビルエネルギー管理システムにも利用できる [2]. また、施設訪問者に対し通路上の歩行者数や混雑度を提供できれば、混雑した通路を避けた屋内ナビゲーションなど高度なユビキタスサービスの実現につながると期待される。

既存の人数推定手法の多くはカメラや赤外線センサなどの設置型センサを用いる [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]. 部屋の入り口など比較的被写体の近距離に設置されたカメラからの動画像から、個々の歩行者を抽出し、正確に人数をカウントするシステムが実用化されつつある [1]. 一方、防犯カメラなどの動画像はプライバシー上の問題から利用が難しい場合もあり、また設置型であるため、ある特定のイベントなどで簡易に人流を測定したい用途などには適していない. 赤外線センサであるレーザーレンジファインダを用いた研究 [8], [9], [10] では、高精度に歩行者の検出を行うことができるが、機器コストが高く、多地点での測定には向かないという課題がある。

一方で、近年 Wi-Fi などの無線通信を用いた人数推定の研究がさかんに行われており、Wi-Fi プローブ要求を用いた手法や Wi-Fi 電波強度を用いた手法が知られている. 文献 [11], [12] では、歩行者が保持するスマートフォンなどの Wi-Fi 端末からの Wi-Fi プローブ要求を解析することで人数推定を行う手法を提案している. しかし、これらの手法では端末の非保持者を計測することができない. これに対し、文献 [15], [16], [17], [18], [19] などでは Wi-Fi 電波強度変化を用いたデバイスフリーな人数推定手法を提案している. これらの手法は Wi-Fi の送受信機間に存在する人体の影響により生じる Wi-Fi 電波強度の変動をとらえて人数推定を行うため、被計測者の端末保持率に依存しない. また、たとえば既設の Wi-Fi アクセスポイント (以下、Wi-Fi AP) とその Wi-Fi AP に接続するクライアント群を用いれば、汎用機器を用いた比較的低コストでかつ設置位置の制約が少ない計測環境が実現できる. しかし、これらの研究ではオフィスなどの空間を比較的低速度で移動したり、一定時間滞留したりする人々を計測対象としているため、

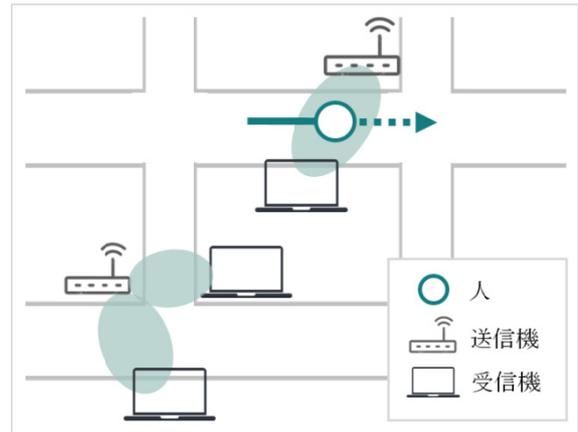


図 1 提案手法による通路上の人数推定

Fig. 1 People counting on walkway.

Wi-Fi 送受信機間を比較的短時間で通過する人々を対象とした人数推定を考慮できていない. 特に、複数人が並んで通行することも多い通路上において通過人数を正しく検出することは容易ではない.

そこで本研究では、Wi-Fi 電波強度を用い、Wi-Fi 送信機と受信機の間を計測領域を通過する歩行者の人数を推定する手法を提案する. 通路を想定する場合、Wi-Fi 送信機 (Wi-Fi AP) と受信機 (Wi-Fi クライアント) の間 (以下、送受信機間) を比較的短時間で歩行者が通過する. 著者らは、先行研究において、歩行者が通過した際の電波強度の変動傾向を調査し、歩行者の通過にともない電波強度が減衰することを示している [20], [21]. この知見に基づき、本論文では、歩行者が通過した際に生じる電波強度の変動を表現するいくつかのパラメータから人数推定に有効な特徴量を検討し、それを用いた学習を行うことで歩行者の通過検出ならびに通過人数の判定を行う手法を構成する. 本研究の想定環境を図 1 に示す.

前述のように、送信機はたとえば施設に既設である Wi-Fi AP やスマートフォンなどの Wi-Fi 端末のテザリング機能を活用し、受信機は PC やスマートフォンなどの Wi-Fi 端末、あるいはマイコンなどで構成可能な専用の小型通信端末を想定し、これらの送受信機が通路を挟んで存在する環境を前提とする. 図 1 のように通路の複数地点で通過人数を推定できれば、それらを統合し、通路全体の人数推定を行うことも可能になると考える.

2. 関連研究

本章では人数推定に関する既存研究を述べる. 2.1 節ではカメラや赤外線センサなど様々なセンサを用いた研究について述べ、2.2 節では Wi-Fi や Bluetooth の電波強度やチャンネル情報を用いた研究についてそれぞれ述べる. 2.3 節では本研究の位置づけを述べる.

¹ 公立はこだて未来大学システム情報科学部
School of Systems Information Science, Future University
Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

² 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

a) b1013053@fun.ac.jp

b) siraisi@fun.ac.jp

c) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

2.1 様々なセンサを用いた人数推定

設置型センサであるカメラからの動画を解析し、人検出を行う研究がさかに行われてきている。文献 [3] では、人が存在する画像と存在しない画像を比較することで特徴点を抽出し、人検出を行っている。さらに、動画画像上の特徴点の移動は歩行者であると判断し、歩行者検出を行っている。文献 [4], [5] では、屋内に設置された防犯カメラを想定し、天井に設置したカメラの動画画像上に仮想的なゲートを設定する。次に、そのゲートを人が通過することによって生じる特徴量を動画画像から抽出するとともに、その特徴量を用いた回帰分析を行うことでゲートの通過人数を推定している。文献 [6] では歩行者の多い都市環境を走行する車両に設置したカメラで撮影した動画画像から歩行者を検出し、それらをデータセットとして用いて、リアルタイムで歩行者検出を行っている。文献 [7] では、人の目線の高さでかつ、様々なアングルをなすよう設置した2台から4台のカメラで撮影した屋内外の動画画像を用い、6人までの同一人物の高精度な検出を行っている。

また、赤外線センサであるレーザレンジファインダを用い、その計測範囲内を移動する歩行者の影響によるセンサ値の変動から歩行者を検出する手法も提案されている [8], [9], [10]。文献 [9] では、室内の複数箇所に設置したレーザレンジファインダのデータを統合して、歩行者の検出を行っている。特に、オクルージョンが頻繁に発生するような群衆密度の高い環境でも歩行者の検出が可能な手法を提案している。文献 [10] では、地上約 20 cm 程度の高さに複数のレーザレンジファインダを設置し、人の足の典型的な動きのモデルに基づいて歩行者の追跡を行っている。

他に、文献 [22] ではスマートフォン付属のマイクで収集可能な音を用いて、バス停や教室内の混雑状況を高精度に推定している。文献 [23] では Mote センサに Radar デバイスを組み合わせ、ポータブルな人検出器を構成している。

2.2 Wi-Fi や Bluetooth のプローブ情報や電波強度を用いた人数推定

2.2.1 Wi-Fi や Bluetooth のプローブ情報を用いた端末数推定

Wi-Fi AP に接続する Wi-Fi 端末が通信を行う際に発信する Wi-Fi プロブ要求を解析することで端末数を推定し、その情報から人数を推定する手法が提案されている。文献 [11], [12] では、Wi-Fi AP 付近に存在する Wi-Fi 機能を有効にしたスマートフォンなどの Wi-Fi 端末保持者の数を推定している。この手法では、Wi-Fi 機能を有効にした Wi-Fi 端末が発信するプローブ要求内の MAC アドレス数を計測することで人数の推定を行っている。特に、文献 [12] では既設の Wi-Fi AP を利用し、それに接続している Wi-Fi 端末の保持者の歩行速度を考慮した人数推定を行っている。

文献 [13], [14] では、多くの人が参加する屋内外のイベントにおいて Bluetooth 機能を有効にしている端末数を計測することで、イベント参加者のおおよその混雑状況を推定している。Bluetooth は Wi-Fi と比べ、AP に接続可能な距離が近いので、複数のタグを設置する必要があることから設置コストが高くなるが、短い間隔で設置されたタグで得られる情報を統合することで、より高精度に人数推定を行うことが可能となる。

これらは比較的広範囲の人数概数を推定する目的に有用であるが、端末を保持しない歩行者や通信機能を有効にしていない端末の計測ができないため、比較的狭い通路などにおける通過人数計測の用途には向いていない。

2.2.2 Wi-Fi 電波を用いたデバイスフリー人数推定

一方、Wi-Fi 電波強度を用いたデバイスフリー人数推定の手法も多く提案されている。文献 [15], [16], [17], [18], [19] では、オフィスなどの比較的広い空間内を比較的低速で移動する人や滞留する人々の影響により生じる Wi-Fi 電波強度の変動から人数推定を行っている。

文献 [15] は、人体による LOS (Line of Sight) ブロッキングによる電波減衰とマルチパスフェージングによる電波強度の変動を、ある一定の移動パターンを前提とした確率モデルで表現し、対象環境で得られる多数の電波強度サンプルを用いてそのパラメータ決定を行うアプローチである。市販の Wi-Fi 送受信機を1組利用する点では提案手法に近いものの、ある一定領域内を動き回る歩行者を 100~300 秒間計測する必要がある、短時間で人々が通過する状況では用いることができない。文献 [16] は、複数の Wi-Fi 送受信機を室内に配置し、人が不在のときの fingerprinting 情報が人の存在によりどのように変化するかを推測することでその存在を推定する。文献 [17] は、Wi-Fi 送信機と複数の Wi-Fi 受信機を利用し、それら複数の受信機からの電波強度をパラメータとした線形回帰モデルにより在室人数を推定する推定器を構築する。これらに対し、提案手法は1組の Wi-Fi 送受信機の第1フレネルゾーンの考慮に基づく決定木学習モデルであり、必要とされる機器やアプローチが本質的に異なる。文献 [18] は屋内空間に1つの Wi-Fi 送信機と3つの Wi-Fi 受信機を設置し、CSI (Channel State Information) 取得のための専用機器を用いる。LOS ブロッキングやマルチパスフェージングの影響により変動する CSI 変動値を2次元化し、歩行者人数が0人か1人または2人のときのデータから訓練データを構築し、多人数の推定を行う。文献 [19] も CSI が取得可能な一対の Wi-Fi 送受信機を室内空間の両端に設置し、300 秒間に取得した CSI データからドップラースペクトルを算出し、室内に滞在している人数の変化により変動するドップラースペクトル値に基づいて人数を推定する。しかし、これらは CSI を用いている点で提案手法とは異なる。

2.3 本研究の位置づけ

提案手法では、Wi-Fi 電波強度を用いて、通路上に設置された市販の Wi-Fi AP と Wi-Fi クライアント機器の間の計測領域を短時間で通過する歩行者を対象とした通過人数推定手法の実現を目指している。提案手法は Wi-Fi 送信機と受信機の間に存在する人体の影響により変動する電波強度を用いるため、被計測者の端末保持率に依存しないデバイスフリー手法である。また、Wi-Fi AP とその Wi-Fi AP に接続しているクライアントがあればよいため、既設 Wi-Fi AP やスマートフォンなど安価で設置も容易な汎用機器を利用でき、処理も軽量である。したがって、設置型のカメラやレーザレンジファインダと比較しハードウェア本体や設置、およびソフトウェアのコストを大きく抑制できる。提案手法は、文献 [15], [16], [17], [18], [19] のようにパッシブな電波強度変化を用いたデバイスフリー手法に分類されるが、文献 [15] は前述のようにある一定領域内を動き回る歩行者を 100~300 秒間計測する必要があるため、提案手法のような短時間で人々が通過していくようなケースには適さない。また、文献 [16], [18] は複数の送受信機から得られる電波強度が人の存在によりどのように変化するかを推測するアプローチであることから、必要な機器やアプローチが異なる。文献 [17], [19] では CSI 取得のための専用機器を用いている点で異なる。受信電波強度とは異なり、物理層におけるサブチャネル群の状態情報である CSI をアプリケーションレベルで取得することは容易でなく、利用機器やソフトウェアの制約が大きいことが課題となる。

3. 提案手法

提案手法の想定環境を図 2 に示す。

提案手法では通路の両側に Wi-Fi 送受信機が存在する環境を想定する。送信機として Wi-Fi AP, 受信機として PC, スマートフォンなどの Wi-Fi 端末を利用することを想定する。本研究では、これらの送受信機間を人が通過した際に生じる電波強度の変動から人数推定を行う。具体的には、通路上の送受信機間の一定領域を歩行者が短時間で通過した際に生じる電波強度の変動特徴を表すパラメータ(特徴量)に基づく分類器を、事前に収集した正解人数ラベル付きの電波強度変動データ集合から構築しておく。その分類器を用いて通過検出およびその通過人数をリアルタイム判定する。

例として、1 人の歩行者が計測領域を通過した際の受信電波強度の変動を図 3 に示す。

図 3 の縦軸は電波強度 (dBm), 横軸は電波強度のサンプル番号であるが、サンプルは等時間間隔で取得しているため経過時刻に対応している。後述する計測領域内に歩行者が進入すると、図 3 の進入時刻 (サンプル 12 番の時刻) から電波強度の減衰が生じる。その後、退出時刻 (サンプル 18 番の時刻) を経過すると電波強度が徐々に回復する。

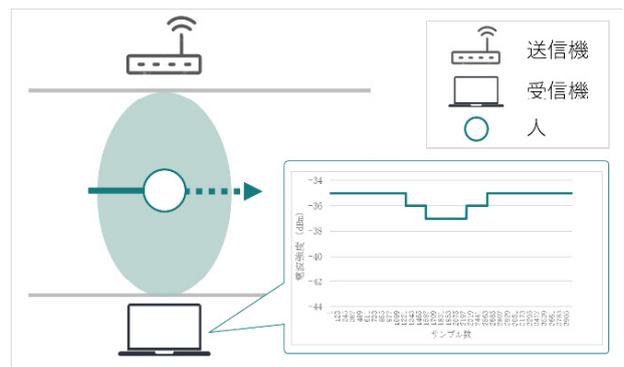


図 2 提案手法の想定環境

Fig. 2 Proposed people counting method.

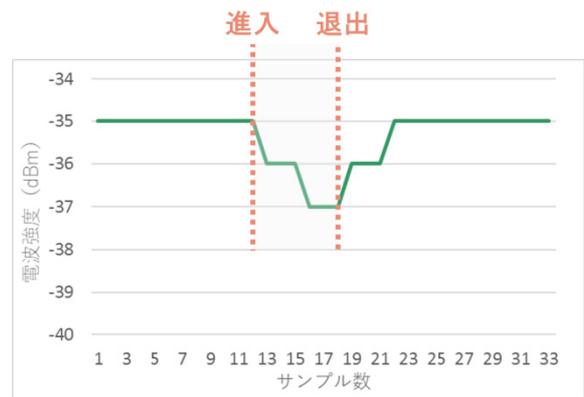


図 3 人の通過にともなう電波強度の変動

Fig. 3 RSS variance by pedestrians.

このように、歩行者が通過した際に生じる電波強度の減衰に着目して人数推定を行う。電波強度の変動傾向をとらえるため、サンプル取得時刻を先頭とした過去一定時間内のウィンドウを用い、スライディングウィンドウにより切り出された各ウィンドウ内のサンプルデータから複数の特徴量を抽出する。これらの特徴量の具体例とその計算方法については、3.2 節で詳細を述べる。なお、通過する歩行者の数や並び方、周辺環境の違いなどにより、電波強度の変動は一定ではない。本研究では、状況により異なる電波強度変動をなるべく正確にとらえるために有効な複数の特徴量を選定する。詳細は 3.2 節で述べる。

提案手法における人数推定の手順を図 4 に示す。

提案手法は学習フェーズと人数推定フェーズから構成される。学習フェーズでは、事前に歩行者数別の電波強度データの取得を行い、その変動傾向を表現する特徴量をウィンドウごとに抽出するとともに、計測領域に存在した人数を正解データとして記録する。ただし、同一の歩行者数でも電波強度の変動が異なる場合があるため、安定した変化を示す特徴量を採用し、その値を学習データ DB に格納する。なお、本研究の対象環境では、電波強度変化は様々な通行パターンで変化量が異なり、特徴量間の相互関係を複数の決定木で直感的に表現することができると考える。したがって有効な特徴量の選択を行うにあたり、決定

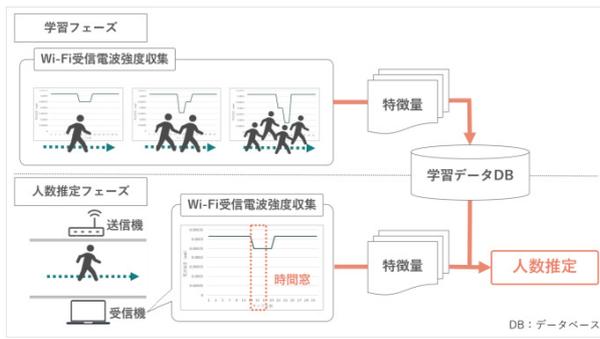


図 4 提案手法における人数推定のプロセス

Fig. 4 People counting procedure.

木学習を用いることとする。

人数推定フェーズでは、推定対象の通路上の計測領域で電波強度データを取得し、前述の特徴量を抽出する。次に、その特徴量データを入力とし、前述の決定木に基づく判定アルゴリズムを用いて人数推定を行う。

3.1 計測領域の定義の検討

電波伝搬における遮蔽物の影響を考慮する場合、第1フレネルゾーンの影響を考慮することが多い。第1フレネルゾーンとは、送受信点からの距離の和が、送受信点間の線分長に半波長 $\lambda/2$ を加えた値に等しいすべての点により構成される楕円体である。遮蔽物による伝搬損失は第1フレネルゾーンの影響の程度で決定されるため、本研究でも第1フレネルゾーンを計測領域と定義し、その計測領域に存在する人を対象として人数推定を行う。フレネル半径 r (m) は式 (1) で算出できる。

$$r = \sqrt{\frac{300}{f} \times \frac{d_1 \times d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1)$$

ここで f は周波数 (MHz) を表し、 $300/f = \lambda$ である。また、図 5 に示すように、 d_1 および d_2 は送受信点を結ぶ直線上の点から、送信機および受信機までの距離をそれぞれ表す。式 (1) により図 5 に示すような楕円体空間の計測領域が規定される。学習フェーズでは、この計測領域内に存在する人数と時刻を正解データとする。

3.2 特徴量の検討

提案手法では、ウィンドウ内の時系列データの変化量を表現する特徴量を列挙し、それらの決定木学習により、人数推定のための決定木を得る。決定木学習にはオープンソースの機械学習ツールである Weka [25] の J48 アルゴリズムを用いる。J48 アルゴリズムは、Quinlan が提案した代表的な決定木アルゴリズムである C4.5 [26] を Java で実装したものであるため、それを利用する。列挙した特徴量を表 1 に示す。

表 1 において、基準値 base は歩行者が計測領域に存在しない場合の電波強度を十分な時間長で計測したときの最頻

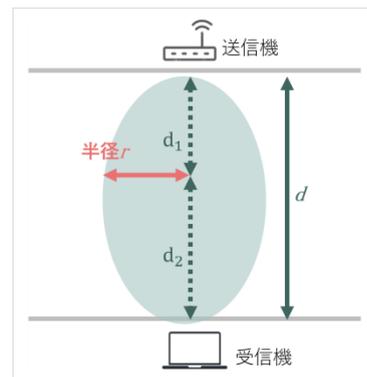


図 5 計測領域の模式図

Fig. 5 People detection area.

表 1 各窓内における検討した特徴量

Table 1 Examined feature values in time window.

属性名称	説明
base	一定時間における電波強度の最頻値
depth	基準値 base と最小値の差の絶対値
depth_rate	depth の継続出現割合
rss_i_variance	分散
rss_i_first	基準値と最初の出現値の差の絶対値
rss_i_end	基準値と最後の出現値の差の絶対値
change_num	電波強度の変化回数

値とする。これは、受信電波強度は歩行者が計測領域に存在しない場合においても、周辺環境の影響により ± 1 dBm 程度変化する場合があるため、このノイズの影響を受けずに安定して取得できる基準値として、一定時間内で最も観測された値 (すなわち、最頻値) を採用することが望ましいと考えたことによる。depth は基準値 base とウィンドウ内の電波強度の最小値との差の絶対値であり、最大減衰量を表現する。

depth_rate はウィンドウ内における depth の継続出現割合であり、人の通過による最大減衰量がどの程度ウィンドウ内で継続するかを表す。rss_i_variance はウィンドウ内の電波強度の分散を表す。rss_i_first は基準値 base とウィンドウ内の電波強度の最初の出現値との差の絶対値、rss_i_end は基準値 base とウィンドウ内の電波強度の最後の値の出現値との差の絶対値を表し、これらはウィンドウが人の通過による電波強度変化のどのタイミングをとらえているかを表現できる。change_num はウィンドウ内の電波強度の変化回数であり、分散とあわせて変化頻度を表現する。

これらの特徴量を用いて、人数推定のための決定木学習を行った。データの計測環境は 4.1 節で述べる環境と同じであり、計測場所 A の両側の壁がコンクリート製で、通路方向に対し送受信機を 90° となるように配置した場合において計測したデータ (データ数: 1,003) を用いている。表 1 に示す特徴量を使用した決定木学習の結果、図 6

に示す決定木が生成された。表 1 の特徴量の候補のうち、depth_rate, rssi_variance, rssi_first, rssi_end が生成された決定木の条件分岐として利用されており、これら 4 つの特徴量が人数推定に有効であると考えられる。

なお、決定木による判定の妥当性を検証するため、上記の決定木学習と同様の計測場所 A で計測したデータを使用し、線形回帰分析と SVR (Support Vector Regression) で 10 分割交差検定を行うことで比較評価を行った。その結果、決定木アルゴリズム J48 の推定精度は 98.8% で、線形回帰分析と SVR の推定精度は 95.0% および 93.1% であった。線形回帰分析と SVR は、実際の通行人数が 1 人の場合に 0 人や 2 人と誤推定するなど、推定誤差が ±1 人の場合が多い結果が得られた。このことから、複数の特徴量の関係性は歩行人数に依存して異なるため、適切な関数選択によるモデル回帰は容易ではないと考えられる。一方で、決定木学習は特徴量間の相互関係を複数の決定木で表現することが可能であるため、精度が最も良い結果が得られたと考える。

3.3 各ウィンドウにおける人数推定

提案手法では得られた決定木を用いた以下のアルゴリズムを設計している。なお、推定歩行者人数を N^g で表し、 i 番目の電波強度サンプル取得時刻を i で表す。時刻 $i - tw$ から i までのウィンドウを SW_i で表す。

STEP1 基準値 $base$ を観測に基づき設定する。以降、 SW_i 内の特徴量 $depth$ を $Depth_i$ で表す。

STEP2.1 $Depth_{i-1} > Depth_i$ の場合、 $N^g = 0$, $i = i + 1$ とする。

STEP2.2 $Depth_{i-1} \leq Depth_i$ の場合、 $N^g \geq 0$ とする。

STEP3 特徴量 depth_rate, rssi_variance, rssi_first および rssi_end を算出し、決定木を用いた N^g の推定を行う。 $i = i + 1$ とする。

STEP1 では、歩行者が 0 人 ($N = 0$) のときの電波強度を一定時間 (数分程度) 観測し、その最頻値を基準値 $base$ に設定する。そして、ウィンドウ SW_i 内における電波強度の最小値と $base$ の差である減衰量 $Depth_i$ を計算する。

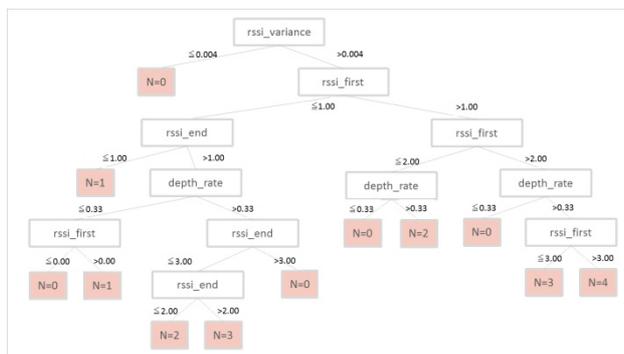


図 6 決定木学習の結果

Fig. 6 The result of decision tree.

このときの SW_i は、ウィンドウサイズ tw に対し、電波強度 $RSSI_{i-tw}$ から $RSSI_i$ を含む。次に、直前のウィンドウ SW_{i-1} 内の減衰量 $Depth_{i-1}$ と比較し、 $Depth_{i-1} > Depth_i$ の場合は、 SW_i は $N^g = 0$ 人とし、 $Depth_{i-1} \leq Depth_i$ の場合は、 $N^g \geq 0$ 人とする。これは、計測領域に歩行者が進入することで電波強度が減衰する傾向が見られるためである。そして、歩行者 $N^g \geq 0$ 人と判断されたウィンドウ SW_i 内から特徴量を抽出し、決定木を用いた人数推定を行う。

4. 性能評価

提案アルゴリズムの性能評価実験を行った。4.1 節では実験環境について述べ、4.2 節では歩行パターン別の精度評価実験について述べる。4.3 節では送受信機の配置方法別の精度評価実験について述べる。4.4 節では計測場所別の精度評価実験について述べ、4.5 節では今後の課題と展望について述べる。

4.1 実験環境

実験環境の設定を表 2 に示す。実験環境は、図 7 に示すように公立はこだて未来大学の通路幅が 2.5m のコンクリートやガラスの壁に挟まれた通路で行った。送受信機の配置方法は通路方向に対して $22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ となるような 4 通りの配置とした。送信機は NEC 社製の Wi-Fi ルータ AtermWR165N で、IEEE802.11b/g/n (2.4 GHz 帯) を使用した。受信機は Android 端末 FJL22 で、電波強度の更新間隔が 3 秒のものを使用し、WifiManager API を用いて 1 秒ごとにデータを取得した。なお、スライディングウィンドウ幅は 3 秒、スライド幅は 1 秒としている。ここで、計測領域を求めるために 3.1 節で述べた式 (1) を用いて計測領域の半径 r を算出する。送受信機間の距離が 2.5m であることから、半径は $d1 = d2 = 1.25m$ の地点で最大となる。このときの r を最大半径 r_{max} とすると、送信機

表 2 実験環境の設定

Table 2 Experimental settings.

項目	詳細
場所	公立はこだて未来大学
計測場所	A, B, C, D
壁の材質	コンクリート, ガラス
送受信機の配置角度	通路方向に対して $22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$
送信機	Wi-Fi ルータ AtermWR165N
受信機	Android 端末 FJL22
Wi-Fi 規格	IEEE802.11b/g/n, 2.4GHz 帯
電波強度の更新間隔	3 秒
群衆間の歩行間隔	離散的通行, 連続的通行



図 7 実験環境

Fig. 7 Snapshot from experiment.

の周波数 $f = 2400$ (MHz) のとき, $r_{\max} = 29.05$ cm となる. このように r の値を計算することで計測領域を算出し, この計測領域内に存在する歩行者を対象として人数推定を行う.

以下では, 1 人, もしくは比較的接近して歩行する 2 人以上の群を便宜上, 群衆と呼ぶ. 文献 [24] では歩行者がすれ違う際にはその歩行に負荷が生じることが指摘されており, 歩行に負荷を与える影響領域は歩行者を中心とした半径 1.35 m の円と定義されている. よって, 本研究ではこの影響領域を採用し, 歩行者は他者との距離を自然に確保すると考えて群衆を定義する. 具体的には, ある歩行者 p がある群衆 P に属することは $|P| = 1$ であるか, または, P に属するある歩行者 p' と p との距離が 1.35 m 未満であることと等価とする. ショッピングモールやビルの通路では, ある群衆が送受信機間を通過した直後に別の群衆が通過する場合や, 2 組の群衆が送受信機間ですれ違う場合なども存在するが, 上記の定義に従って計測データの歩行パターンを分類することで, そういった歩行パターンの多様性を定量的に表現できる. 具体的には, 2 つの群衆が 1.35 m 以上の間隔で計測領域を通過した状況 (以下, 離散的通行) と, 1 つの群衆が連続的に通過し続ける状況 (以下, 連続的通行) に分類し, それらの違いが精度に与える影響を評価する. なお, 実験における歩行者密度は 1m^2 あたり 0~1.0 人であり, 文献 [24] に基づくとほぼ混雑のない状況に分類される. 各歩行者は通路上をほぼ等速で直進歩行し, 他の歩行者による歩行妨害などはなかった.

4.2 歩行パターン別の精度評価実験

3.2 節では, 離散的通行と連続的通行が混在する環境下でのデータを使用し特徴量を選定しているが, 様々な状況における提案手法の可用性を示すためには, 提案手法が離散的および連続的通行のいずれにも対応可能であることが望まれる. 本節では歩行パターン別の精度評価結果を述べる. なお, 計測データとして, 計測場所 A の通路方向に対し 90° をなすように送受信機を配置した場合のものを利用した.

表 3 離散的通行の人数推定精度評価結果

Table 3 Case for intermittent passing of pedestrians.

		実人数 (実際の歩行者数)				
		$N=0$	$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=4$
推定結果	$N^g = 0$	781	2	1	0	2
	$N^g = 1$	2	77	0	0	0
	$N^g = 2$	1	1	13	3	0
	$N^g = 3$	0	0	1	14	0
	$N^g = 4$	0	0	1	2	6
F-measure		0.995	0.969	0.765	0.824	0.706

まず, 計測領域を歩行者 ($N = 0 \sim 4$ 人) が離散的通行した際の計 907 の電波強度データより特徴ベクトル空間を生成し, 機械学習ツール Weka を用いて決定木の J48 による通行人数の推定を行った. 10-分割交差検定で精度評価を行った結果, 98.2% の推定精度が得られた. 表 3 にデータの分類結果を示す. また, 各歩行者数 ($N = i$) における推定精度として, 分類システムの代表的な評価指標である F 値 ($F\text{-measure}$) を算出し, 分類結果とともに示す. 歩行者数 $N = i$ のときの $F\text{-measure}_{N=i}$ は, 歩行者数 $N = i$ に対する適合率 ($Precision_{N=i}$) と再現率 ($Recall_{N=i}$) により計算する. それぞれの計算式を, 式 (2), 式 (3), 式 (4) に示す.

$$F\text{-measure}_{N=i} = \frac{2 \times Precision_{N=i} \times Recall_{N=i}}{Precision_{N=i} + Recall_{N=i}} \quad (2)$$

$$Precision_{N=i} = \frac{\text{推定結果の中で実際に } N = i \text{ である数}}{N = i \text{ と推定された数}} \quad (3)$$

$$Recall_{N=i} = \frac{N = i \text{ と推定された数}}{\text{実際に } N = i \text{ である数}} \quad (4)$$

表 3 の $F\text{-measure}$ に着目すると, すべて 0.700 以上であることからおおそ高い精度で人数推定を行うことができている. また, 通行人数が 0 人の場合のデータ数は, 歩行者が通過していない場合のデータに加え, 歩行者が送受信機を通過した直後のデータも含むため, 他のケースより多い.

次に, 表 3 で使用した離散的通行のデータに加え連続的通行のデータを統合した計 1,003 の電波強度データに対し, 決定木を用い, 10 分割交差検定で評価を行った結果, 98.8% の推定精度が得られた. 表 4 にデータの分類結果と, $F\text{-measure}$ を示す.

表 4 より全体的に高精度に人数推定を行うことができているが, 表 3 と比べ実際の通行人数は 0 人だが 1 人や 2 人と誤推定するケースが増加していることが分かる. これは, 2 人の歩行者が計測領域を通過した際に減衰した電波強度が基準値に戻る前に, もう 1 組の歩行者が計測領域を通過したことで, 電波強度が通常より大きく減衰したことが原因であった. これに対し, スライディングウィンドウ

表 4 連続的通行の人数推定精度評価結果

Table 4 Case for continuous passing of pedestrians.

		実人数 (実際の歩行者数)				
		N=0	N=1	N=2	N=3	N=4
推定結果	$N^g=0$	853	1	1	0	0
	$N^g=1$	4	84	0	0	0
	$N^g=2$	4	0	15	2	0
	$N^g=3$	0	0	0	24	0
	$N^g=4$	0	0	0	0	15
F-measure		0.994	0.971	0.811	0.960	1.000

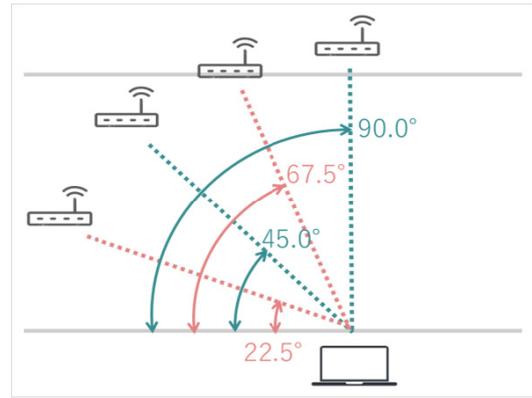


図 8 送受信機の配置角度

Fig. 8 Arrangement angle of transmitter and receiver.

の窓幅を短くするなどの対処方法が考えられるが、推定精度が9割以上であることから、本論文では推定精度に大きな影響はないと考える。

また、3.2節の特徴量選択および4.2節の表4は、離散的通行と連続的通行が混在する環境下で、同じ条件で実験を行っており、4.2節の連続的通行の実験では、図6の決定木が得られる。4.1節の定義より、連続的通行時の歩行者間の距離は1.35m未満であり、本論文で実験を行った幅2.5mの通路では、第1フレネルゾーンの大きさが最も広いところでも60cm程度であるため、計測領域外では離散的通行と判断される2組の群衆が送受信機間付近ですれ違うような場合でも、計測領域である第1フレネルゾーン内ではつねに連続的通行と判断される。たとえば一方から1人の歩行者が計測領域に近付き、他方から2人の歩行者が近付き、計測領域内においてすれ違う場合は、3人の歩行者グループ(連続的通行)と認識されるため、計測結果は0人→3人→0人となる。

4.3 送受信機の配置方法別の精度評価実験

Wi-Fi APなど、既設機器を用いる場合にはそれらの配置位置関係が必ずしも通路方向に対し直角にならない場合も多い。そういった際の可用性を示すため、送受信機の組を通路に対して異なる角度に配置して、送受信機の相対位置が精度に与える影響を含めた推定精度の評価を行った。図8のように送受信機を計測場所Aの通路方向に対し22.5°、45°、67.5°、90°となるようにし、送受信機間距離は2.5mとなるよう配置した。このとき、計測領域内に存在する歩行者は最大で4人であり、群衆の歩行パターンとしては離散的通行と連続的通行が混在していた。

次に、送受信機を通路方向に対し、22.5°、45.0°、67.5°、90°となるよう配置した場合(以下、それぞれ22.5°配置、45.0°配置、67.5°配置、90°配置)の推定精度を評価した。22.5°配置は計219ケース、45.0°配置は計2,491ケース、67.5°配置は計407ケース、90°配置は1,003ケースの電波強度データに対し、決定木を用いて通行人数の推定を行った。10-分割交差検定で精度評価を行った結果、22.5°配置

表 5 送受信機の22.5°配置時の人数推定精度評価結果

Table 5 Case for placement of angle 22.5°.

		実人数 (実際の歩行者数)			
		N=0	N=1	N=2	N=3
推定結果	$N^g=0$	184	0	1	0
	$N^g=1$	1	11	0	0
	$N^g=2$	1	0	11	0
	$N^g=3$	0	0	4	6
F-measure		0.992	0.957	0.786	0.750

表 6 送受信機の45.0°配置時の人数推定精度評価結果

Table 6 Case for placement of angle 45°.

		実人数 (実際の歩行者数)				
		N=0	N=1	N=2	N=3	N=4
推定結果	$N^g=0$	1908	1	0	0	0
	$N^g=1$	4	415	0	0	0
	$N^g=2$	0	0	114	0	0
	$N^g=3$	0	0	1	29	0
	$N^g=4$	0	0	1	0	18
F-measure		0.999	0.994	0.991	0.983	0.973

は96.8%、45.0°配置は99.7%、67.5°配置は97.1%、90°配置は98.8%の推定精度が得られた。それぞれのデータ分類の結果とF-measureを表5、表6、表7、表4に示す。

それぞれ、F-measureはおおよそ9割以上であり、全体的に高精度に人数推定を行うことができている。このことから、選択した特徴量が有効であることが示唆される。ここで、実際の通行人数が2人の場合に3人および4人と誤推定している場合に着目し、誤推定の原因を分析した。その結果、計測領域内に存在する複数の歩行者が図9(i)のように電波の進行方向上に並んだ場合、人体による電波強度への影響が小さくなってしまったことが原因の1つと考える。このことから、90°配置と67.5°配置の場合は、他の配置方法と比べ、電波の進行方向上に複数人が並ぶケースが

表 7 送受信機の 67.5° 配置時の人数推定精度評価結果

Table 7 Case for placement of angle 67.5°

		実人数 (実際の歩行者数)				
		N=0	N=1	N=2	N=3	N=4
推定結果	$N^s=0$	259	0	0	0	1
	$N^s=1$	6	32	0	0	0
	$N^s=2$	1	0	72	0	0
	$N^s=3$	0	0	2	22	0
	$N^s=4$	0	0	0	2	10
F-measure		0.985	0.914	0.980	0.917	0.870

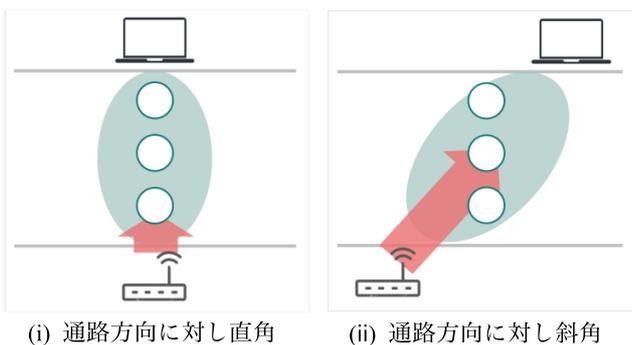


図 9 電波進行方向上の歩行者の重なり方

Fig. 9 Occlusion by pedestrians.

あり、誤推定するケースが出現したと考えられる。これに対し、45° 配置時の通行人数が $N = 3 \sim 4$ 人のときの適合率を算出すると 1.000 であることから、図 9(ii) のように送受信機を通路方向に対し、ある程度斜角をなすように配置することで、電波の進行方向上に複数人の歩行者が重なるケースを削減することができたと考える。しかし、22.5° 配置では比較的低い精度が得られた。これは、1 人の歩行者が計測領域を通過した場合、計測領域に存在する時間が他の配置方法の場合と比べ、長くなっていたことから、電波強度が大きく減衰し、誤推定したと考えられる。

以上の結果より、送受信機を通路方向に対しいずれの角度の場合でも高精度に推定を行うことができたが、特に、送受信機を通路方向に対し 45° をなすように配置する場合は、複数人が並んで歩行する場合の精度低下への影響を緩和することができることが分かった。このことから、以降の実験では送受信機を通路方向に対し 45° 配置し、実験を行う。

4.4 計測場所別の精度評価実験

本節では、施設内の複数個所で人数推定を行うことを想定し、図 10 のように同施設内の 4 カ所における評価を行った。

電波強度の計測は、ある通路の入り口 (以下、計測場所 A) と、同一通路の計測場所 A から 10m 離れている通路の中央 (以下、計測場所 B)、計測場所 A から 50m 離れ

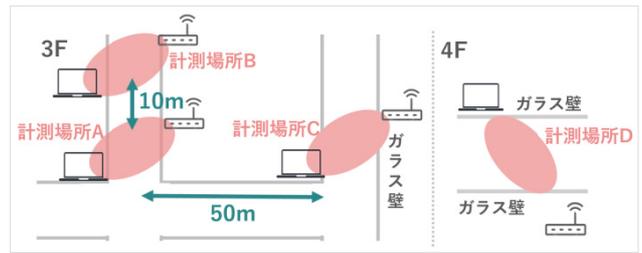


図 10 計測箇所

Fig. 10 Areas of measurement.

表 8 通路中央のデータ群 b の精度評価結果

Table 8 Case for dataset "b".

		実人数			
		N=0	N=1	N=2	N=3
推定結果	$N^s=0$	170	0	0	0
	$N^s=1$	3	37	0	0
	$N^s=2$	1	0	21	0
	$N^s=3$	2	0	0	16
F-measure		0.983	0.961	0.977	0.941

ている異なる通路の入り口 (計測場所 C) と異なるフロアの通路の中央 (計測場所 D) で行った。計測場所 A と計測場所 B の通路の壁はどちらもコンクリート製であり、歩行者が送受信機間を通過した際に取得したデータはそれぞれ 2,491 ケース (以下、データ群 a)、250 ケース (以下、データ群 b) であった。計測場所 C の通路の片側壁はコンクリート製とガラスであり、取得したデータは 295 ケース (以下、データ群 c) で、計測場所 D の通路の壁はどちらもガラスであり、取得したデータは 365 ケース (以下、データ群 d) であった。データ群 a とデータ群 d は、計測領域に同時に存在する歩行者は最大 4 人であり、データ群 b とデータ群 c では、最大 3 人であった。また、いずれのデータも送受信機を通路方向に対し 45° をなすように配置し、その間を通過する群衆は離散的通行と連続的通行を行っていた。

まず、これらのデータのうち、データ数が多いデータ群 a を訓練データとして生成した検出器 a を使用し、データ群 b、データ群 c、データ群 d (歩行者数 $N = 0 \sim 4$ 人) を決定木で評価した。その結果、それぞれ 97.6%、98.0%、94.7% の精度で人数推定を行うことができた。このときのデータの分類結果を表 8、表 9、表 10 に示す。

表 8 より、通行人数が $N = 0 \sim 3$ の場合に、それぞれ高い精度で推定することができていることが分かる。この結果より、今回の実験で生成した検出器 a は、同一通路の異なる計測場所において有効であると考えられる。ここで、計測場所 A と計測場所 B における周辺環境について考察したところ、計測場所 A と計測場所 B は 10m しか離れていなかったことから、周辺 AP 数などの計測場所周辺

表 9 通路中央のデータ群 c の精度評価結果

Table 9 Case for dataset "c".

		実人数			
		N=0	N=1	N=2	N=3
推定結果	$N^g=0$	193	0	0	0
	$N^g=1$	0	33	0	0
	$N^g=2$	5	0	37	0
	$N^g=3$	1	0	0	26
F-measure		0.985	1.000	0.937	0.981

表 10 通路中央のデータ群 d の精度評価結果

Table 10 Case for dataset "d".

		実人数 (実際の歩行者数)				
		N=0	N=1	N=2	N=3	N=4
推定結果	$N^g=0$	253	15	0	0	0
	$N^g=1$	0	17	3	0	0
	$N^g=2$	0	0	41	0	0
	$N^g=3$	0	0	1	29	0
	$N^g=4$	0	0	0	0	6
F-measure		0.971	0.654	0.953	0.983	1.000

の環境条件にほとんど違いがなかったと考える。

ここで、各計測場所における基準値 base に着目すると、計測場所 A は -39 dBm で計測場所 B は -38 dBm、計測場所 C は -37 dBm、計測場所 D は -34 dBm であった。計測場所 A と計測場所 B は同一通路上であることから、base の差異は小さく、計測場所 A と同フロア上にある計測場所 C や別フロア上にある計測場所 D では base が -2 dBm 以上異なっている。このことから、計測領域を歩行者が通過した場合の人体の影響による電波強度の減衰割合に差が出てしまったため、精度が変化したと考える。

また、実際の通行人数は 0 人だが、通行人数が 1 人以上と誤推定したケースに着目し、誤推定した原因を考察した。その結果、電波強度に影響を与える条件が変化することで電波強度が変動し、実際の通行人数は 0 人だが、1 人以上と誤推定したと考える。その電波強度に影響を与える条件の 1 つとして、通路の壁の材質がある。計測場所 B のように両側の壁がコンクリート製では、前述の誤推定ケースは存在しなかったが、計測場所 C や計測場所 D のように少なくとも片側壁がガラス製である場合、前述の誤推定ケースが存在した。電波特性として、電波は対コンクリートの透過性が低い、対ガラスの透過性は高い性質がある。ガラス壁がある場合は、送信機から発信された電波はガラスを透過する際に減衰し、その先に電波反射体があれば反射するため、反射波の到達環境が異なってくる。したがって、誤推定の一因として、ガラス越しに存在する電波反射体の有無やその大きさ、位置により、反射波が学習環境と

は異なる様相で受信電波強度に影響を与えることがあげられる。このようなケースに対応するため、1 つの送信機に対し複数の受信機を配置し、複数の電波強度データの減衰のタイミング差を考慮する必要があると考える。

4.5 今後の課題と展望

計測場所別の精度評価実験では、同施設内であれば計測場所に大きく依存することなく高精度に人数推定を行うことができたことを示している。また、歩行パターン別の精度評価実験においても、群衆の連続的通行の人数推定も高精度で実現できている。一方でいくつかの誤推定が発生したため、提案手法のさらなる改善として、1 つの送信機に対して複数の受信機を配置し、複数の電波強度データの減衰するタイミング差を考慮する方法などを検討している。

表 3~表 10 の精度評価実験の結果を見ると、歩行者数ごとのサンプル数に偏りが生じている。歩行者が 0 人 ($N=0$) の場合のサンプル数が多い理由については、4.2 節で述べたとおりである。一方で、歩行者が 2~3 人 ($N=2, 3, 4$) の場合では、歩行者が 1 人 ($N=1$) の場合と比較してサンプル数が少なくなっている。本論文では、一般の歩行者が自由に歩行する環境で実験を行っており、意図的あるいは作為的に歩行者の通行パターンを設定しているわけではないため、このようにサンプル数に偏りが発生しうる。また、正解ラベルの付与を目視で行っているため、仮に長期間のデータを観測したとしても、膨大な手間を要する。ただし、サンプル数が少ない場合でも、自然な歩行で発生しうる歩行パターンはおおよそ出現しており、その観点では妥当な実験結果であると考えられる。具体的には、計測場所 B で計測したデータ群 b のうち通行人数が 4 人である 19 件のデータについて、4 人の通行者が横に並んで Wi-Fi 送受信機間を通過する場合や、2 人が横に並んでいる群衆が連続して 2 組通過する場合、1 人が通過した直後に横一列にならんだ 2 人が通過し、その直後に 1 人の通行者が通過する場合など、ある程度多様な歩行パターンが出現しており、一定の網羅性があつたと考える。

4.2 節、4.3 節、4.4 節の実験では、すべて通路幅 2.5 m の通路を対象としているが、この場合 $r_{max} = 29.05$ cm であり、第 1 フレネルゾーンの最も広いところでも約 60 cm である。したがって、通路幅 2.5 m の環境においては、本研究で計測領域としている第 1 フレネルゾーン内に存在できる人数としては 4 人までを想定することが妥当であり、その人数までの推定ができれば十分であると考えられる。ショッピングモールやビル (デパート、オフィス) などの屋内環境では、幅 2.5 m 程度の通路は多く存在すると考えられ、提案手法の適用範囲は十分広いと考えられる。本論文の実験結果を通して、幅 2.5 m の通路においては提案手法について一定の有用性が示されていると考える。

一方で、実環境を考えると、より幅の広い通路や壁のな

い通路がありうる。ショッピングモールや地下街などの環境での提案手法の適用を考えた場合には、より幅の広い通路が存在すると考えられ、通路幅が広くなれば、送受信機間の距離も長くなり、距離に反比例して受信電波強度が減衰する。また、計測領域に存在する人数が多くなれば、電波伝搬の様相も、より複雑になると考えられる。4.4節の実験では、通路の両側の壁の材質（コンクリート、ガラス）の異なる環境での評価実験を行っているが、デパートや図書館などの屋内の公共空間を考えた場合には、通路の両側（あるいは片側）に壁がない場合も考えられ、電波伝搬も大きく異なると考える。今後、こうした測定環境の多様性を考慮しながら、提案手法の有用性や通行人数推定に有効な特徴量の検討を進める必要があると考える。

提案手法の適用方法の一例としては、通路全体に網羅的に送受信機の組を設置して、通行人数の推定を行うのではなく、通路の出入口や通路の途中などに送受信機の組を設置することで、要所での人数推定を行うことも考えられる。通路が交差するような通路の出入口において、通過する歩行者の人数の測定ができれば、その通路の歩行者の流入量や流出量の推定に役立てることもできると考える。

また、受信機としては電波強度の更新間隔が3秒であるスマートフォンを利用したが、低サンプリングレートでの高精度な人数推定の実現は、バッテリー駆動のスマートフォンを用いた簡易な推定において有利である。一方で、高レートで電波強度が取得可能な端末を使用した場合には平滑化やダウンサンプリングなどの処理も必要となる。そういった処理も組み込み、任意のレートでのデータ処理アルゴリズムとする予定である。

本研究を通じて、同施設内の複数の計測場所における一定精度の人数推定の実現に道筋がついたことから、今後は複数箇所における計測領域の推定結果を統合し、施設内全体通路上における人流推定を行う手法へ展開していきたいと考えている。

5. おわりに

本研究の目的は、Wi-Fi 電波強度を用いて、通路上の計測領域における通行人数を推定する手法を提案することである。本論文では、通路の両側に送信機と受信機が配置されていることを想定し、送受信機間の計測領域を歩行者が通過した際の電波強度変化をとらえて人数推定を行う方法を提案した。第1フレネルゾーンをもとに計測領域を設定することで歩行者の通過判定方法を検討し、時系列の電波強度変化を定量化するための特徴量を抽出した。これらの特徴量を用い、送受信機の配置や配置場所を変えた場合の検出精度を評価した。その結果、いずれの場合もF-measureがおおよそ0.9以上で検出が可能であることが分かった。今後の課題として、より多様な通路環境を考慮し、複数の受信機におけるデータ取得および評価実験を

行っていきたい。

謝辞 本研究の一部はJSPS 科研費 JP15H02690 の助成を受けたものである。本研究の一部は東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究による。

参考文献

- [1] 原田典明, 青木 勝, 三上明子, 峯下聡志, 斎藤志傑: 人の行動を「見える化」する動線解析技術と活用例, *NEC 技報*, Vol.64, No.3, pp.16–21 (2011).
- [2] Nagarathinam, S., Vasani, A., Ramakrishna P.V., Iyer, S.R., Sarangan, V. and Sivasubramanian, A.: Centralized Management of HVAC Energy in Large Multi-AHU Zones, *Proc. ACM BuildSys'15*, pp.157–166 (2015).
- [3] Fujisawa, S., Hasegawa, G., Taniguchi, Y. and Nakano, H.: Pedestrian Counting in Video Sequence based on Optical Flow Clustering, *Proc. 11th International Conference on Applications of Electrical and Computer Engineering*, pp.51–56 (2012).
- [4] 川西康友, 清水渚佐, 椋木雅之, 美濃導彦: 固定カメラ映像を対象とした回帰と通過検出の併用による通過人数カウント, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU, パターン認識メディア理解, Vol.114, No.90, pp.49–54 (2014).
- [5] Ma, Z. and Chan, A.B.: Crossing the Line: Crowd Counting by Integer Programming with Local Features, *Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2013)*, pp.2539–2546 (2013).
- [6] Enzweiler, M. and Gavrilu, D.M.: Monocular Pedestrian Detection: Survey and Experiments, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.31, No.12, pp.2179–2195 (2009).
- [7] Fleuret, F., Berclaz, J., Lengagne, R. and Fua, P.: Multi-camera People Tracking with a Probabilistic Occupancy Map, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.30, No.2, pp.267–282 (2008).
- [8] Fod, A., Howard, A. and Mataric, M.J.: Laser-Based People Tracking, *IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp.3024–3029 (2002).
- [9] Takafuji, T., Fujita, K., Higuchi, T., Hiromori, A., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Indoor Localization Utilizing Tracking Scanners and Motion Sensors, *The 11th IEEE International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing*, pp.112–119 (2014).
- [10] Zhao, H. and Shibasaki, R.: A Novel System for Tracking Pedestrians using Multiple Single-row Laser-range Scanners, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, Vol.35, No.2, pp.283–291 (2005).
- [11] Fukuzaki, Y., Mochizuki, M., Muraio, K. and Nishio, N.: A Pedestrian Flow Analysis System using Wi-Fi Packet Sensors to a Real Environment, *Proc. UbiComp'14 Adjunct (HASCA2014 Workshop)*, pp.721–731 (2014).
- [12] Li, K., Yuen, C. and Kanhere, S.: Sense Flow: An Experimental Study of People Tracking, *Proc. 6th ACM Workshop on Real World Wireless Sensor Networks*, pp.31–34 (2015).
- [13] Weppner, J. and Lukowicz, P.: Bluetooth based Collaborative Crowd Density Estimation with Mobile Phones, *2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp.193–200 (2013).
- [14] Jamil, S., Basalamah, A., Lbath, A. and Youssef, M.: Hybrid Participatory Sensing for Analyzing Group Dynamics in the Largest Annual Religious Gathering, *Proc. 2015 ACM International Joint Conference on Perva-*

sive and Ubiquitous Computing (UbiComp'15), pp.547–558 (2015).

- [15] Depatla, S., Muralidharan, A. and Mostofi, Y.: Occupancy Estimation Using Only WiFi Power Measurements, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.33, pp.1381–1393 (2015).
- [16] Xu, C., Firner, B., Moore, R.S., Zhang, Y., Trappe, W., Howard, R., Zhang, F. and Ning, A.: SCPL: Indoor Device-free Multi-subject Counting and Localization using Radio Signal Strength, *Proc. 12th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp.79–90, ACM (2013).
- [17] Yoshida, T. and Taniguchi, Y.: Estimating the Number of People using Existing WiFi Access Point based on Support Vector Regression, *Information*, Vol.19, No.7A, pp.2661–2668 (2016).
- [18] Xi, W., Zhao, J., Li, X.Y., Zhao, K., Tang, S., Liu, X. and Jiang, Z.: Electronic Frog Eye: Counting Crowd using WiFi, *Proc. IEEE INFOCOM 2014*, pp.361–369 (2014).
- [19] Domenico, S.D., Pecoraro, G., Ciane, E. and Sanctis, M.D.: Trained-once Device-free Crowd Counting and Occupancy Estimation using WiFi: A Doppler Spectrum Based Approach, *Proc. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp.1–8 (2016).
- [20] 倉 聖美, 松林 勝, 白石 陽: 屋内施設利用者の歩行通路決定のための Wi-Fi 電波強度を用いた人数推定手法の提案, 第 24 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.76–83 (2016).
- [21] 倉 聖美, 白石 陽, 山口弘純: Wi-Fi 電波強度を用いた通路上における通行人数推定手法の検討, 情報処理学会研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ, 2017-ITS-68, No.4, pp.1–8 (2017).
- [22] Kannan, P.G., Venkatagiri, S.P., Chan, M.C., Ananda, A.L. and Peh, L.-S.: Low Cost Crowd Counting using Audio Tones, *Proc. 10th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, pp.155–168, ACM (2012).
- [23] He, J. and Arora, A.: A Regression-based Radar-mote System for People Counting, *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp.95–102, IEEE (2014).
- [24] 高橋英明, 佐野友紀, 渡辺仁史: 群集交差流動における歩行領域確保に関する研究: 歩行領域モデルを用いた解析, 日本建築学会計画系論文集, No.549, pp.185–191 (2001).
- [25] Weka3 – Data Mining with Open Source Machine Learning Software in Java (online), available from (<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>) (accessed 2016-06-28).
- [26] Quinlan, J.R.: Improved Use of Continuous Attributes in C4.5, *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol.4, pp.77–90 (1996).



倉 聖美

平成 29 年公立はこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科卒業。Wi-Fi 技術を用いた人数推定に関する研究に従事。



白石 陽 (正会員)

平成 14 年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程単位取得退学。東京大学空間情報科学研究センター研究機関研究員, 助手, 助教を経て, 平成 21 年より公立はこだて未来大学助教。平成 28 年より同大学教授。博士 (工学)。

センサネットワーク, データベース, 高度交通システムに関する研究に従事。ACM, 電子情報通信学会, 地理情報システム学会等各会員。



山口 弘純 (正会員)

平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 10 年同大学大学院基礎工学研究科後期課程修了。平成 11 年同大学助手。平成 19 年より同大学大学院情報科学研究科准教授。博士 (工学)。モバイルコンピューティング等

に関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。