

推薦論文

ゼロエフォートセンシングによる 屋内Wi-Fi APの3次元位置推定手法

天野 辰哉^{1,a)} 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹

受付日 2020年7月14日, 採録日 2021年2月2日

概要: 本論文では, GPS による位置情報が付与された屋外の Wi-Fi ビーコン観測データと, 位置情報が含まれない屋内の観測データに基づく, 屋内に設置された Wi-Fi アクセスポイント (AP) の 3 次元位置推定手法を提案する. 提案手法では, 屋外におけるビーコン観測とその観測位置情報を基に電波伝搬シミュレーションを活用し, 建物壁面上に存在すると考えられる仮想的な AP 位置を推定する. 同時に位置情報を持たない屋内の観測データから 3 次元多次元尺度構成法により屋内 AP の相対的な位置関係を推定し, この相対的な AP 位置と推定済みの絶対座標上の仮想的な AP 位置の 3 次元位置合わせにより, 屋内 AP の 3 次元空間上の絶対位置を推定する. これにより屋内の観測位置情報や位置の基準となるアンカーなどを利用せずに屋内 AP 位置が推定可能となり, 協力ユーザによる手動の観測位置入力といったいっさいの能動的なタスクを要求しないゼロエフォートセンシングによる AP 位置推定が可能となる. 提案手法を実装し大学キャンパス内で実験を行った結果, 屋内観測の位置情報をいっさい用いることなく, 平均位置誤差 8.8m で屋内の AP 位置を推定できることを確認した.

キーワード: Wi-Fi, 3 次元 AP 位置推定, クラウドセンシング, ゼロエフォートセンシング

3-D Localization of Indoor Wi-Fi Access Points via Zero-Effort Sensing

TATSUYA AMANO^{1,a)} HIROZUMI YAMAGUCHI¹ TERUO HIGASHINO¹

Received: July 14, 2020, Accepted: February 2, 2021

Abstract: In this paper, we propose a localization method of indoor Wi-Fi access points (APs) via opportunistic zero-effort sensing. We leverage collected RSS measurements of Wi-Fi beacons with GPS locations outside buildings by crowd-sensing participants. Using the information, we firstly estimate virtual AP locations named “Tx-Tiles” on the building walls. Simultaneously, we collect RSS measurements inside each building without GPS locations and apply a 3-D Multi-dimensional Scaling (MDS) technique to estimate the relative coordinates of APs in the building. We utilize the Tx-Tiles as location anchors in the MDS localization and obtain the physical 3-D coordinates in the building. Our method does not require any tagging by participants (no human intervention) and does not need any indoor location anchors for 3-D AP localization.

Keywords: Wi-Fi, 3D access point localization, crowd-sensing, zero-effort sensing

1. はじめに

第五世代移動通信システム (5G) の登場によりスマートフォンなどのモバイル機器は高速・大容量でのネットワーク接続手段を獲得しつつあるが, その通信コストの高さと

限られた利用可能範囲のため, 依然として Wi-Fi はモバイル機器がインターネットに接続する主な手段として広く利用されている. また Wi-Fi は低コストのスマートシティ基盤としても注目を集め, たとえばスペインのバルセロナでは, 街灯の照度や人流, 騒音レベルなどの都市インフラか

¹ 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) t-amano@ist.osaka-u.ac.jp

本論文の内容は 2019 年 7 月のマルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2019) シンポジウムで報告され, モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

らの情報を Wi-Fi ベースのプラットフォームで集約している [1].

一方で、人口集中都市の中心部ではオフィスの集中、屋外用の Wi-Fi アクセスポイント (AP) の無秩序かつ過密な設置、モバイルルータの急増、公衆 Wi-Fi の普及などにより、AP 数とデバイス数は増加の一途をたどっており、過密環境における混沌とした周波数利用状況に拍車をかけている。このような過密 Wi-Fi 問題に対して、AP やクライアントすべてがチャンネル制御や帰属制御の判断に利用できるような Wi-Fi の「通信環境コンテキスト」に関するデータベース (Wi-Fi データベース) をモバイルクラウドセンシングや参加型センシングにより構築する取り組みがなされている [2], [3]。一般的に Wi-Fi データベースは、協力者のスマートフォンなどの観測端末から収集される ESSID, BSSID, 通信リンク速度, スループット, 受信信号強度 (RSSI) などの様々な観測データを GPS の位置情報とともに集約することで構築される。特にそれらの情報から推定される各 AP の位置情報は、ネットワーク管理者による既設 AP 間の干渉検出や新規 AP の設置位置や使用周波数帯の検討に有用である。また、スマートフォンなどの移動型 Wi-Fi クライアントが隣接するビルの AP や他の階層の AP といった、遠方の AP のビーコンを偶然に検出して無理に接続を試みたり、移動により離れつつある AP との接続を無理に維持しようとしたりすることで発生する「つながらない」状況に対して、適切な帰属制御や AP 選択・ハンドオーバー制御への AP 位置データベースの活用が期待されている。

このような背景をうけ本研究では、スマートフォンでのクラウドセンシングによる都市広域の AP 位置データベースの構築を目的とする AP 位置推定手法を提案する。クラウドセンシングにより収集される観測データの活用を想定した AP の位置推定手法はこれまでも提案されているが、既存手法の多くは観測位置の情報とその位置での周辺 AP からのビーコンの RSSI を基に AP 位置を推定するため、GPS の利用が困難である屋内への適用の際には、正確な観測位置情報の取得が課題となっている。

これに対し既存手法では、クラウドセンシング協力者による観測位置情報の手動入力や観測端末の内蔵センサを利用したデッドレコニング (自律航法)、建物の窓際や出入口で局所的に得られる GPS 位置情報などを活用して観測位置を取得する、あるいは位置が既知の AP や RFID, iBeacon などを活用した他の電波測位システムを利用するといった方法が用いられる。しかし、協力者に自己位置を手動で入力させることは、協力者の作業負担を増大させ多数の協力者を確保することが困難なクラウドセンシングにおいて適切ではない。また、デッドレコニングを用いる方法では、Wi-Fi のチャンネルスキャンに加え、加速度センサやジャイロセンサなど内蔵センサの値の常時取得が必要に

なり端末の電力消費が大きくなるため、バッテリー電力消費の観点で協力者の負担を増やすことにつながる。位置基準となる AP の設置やその他測位システムの利用は、多数の建物における導入が容易ではなく、広域のクラウドセンシングには適さない。

これらの問題に対して提案手法では協力者の負担の大きいデッドレコニングや観測時の手動での位置ラベル付けなど能動的なタスクをいっさい要求しないセンシングによる屋内 AP 位置推定を実現する。まず協力者のスマートフォンによる、建物内の一部の AP からのビーコン観測データと GPS によるその観測位置情報を基に、当該建物の壁面上に存在すると見なせる仮想的な AP の位置を推定する。同時に位置情報を含まない屋内の観測データも収集し、その屋内のデータのみから屋内 AP どうしの相対距離を推定する。そして、相対距離に対して多次元尺度構成法 (MDS) を適用することで屋内 AP の 3 次元の相対的な位置マップを生成する。さらに推定済みの壁面上の仮想 AP の相対位置マップ内における場所 (相対座標) を特定し、それらの相対座標と屋外から推定済みの絶対座標の組に対してプロクラustes 解析を適用することによって、相対座標系から絶対座標系への 3 次元変換を得る。最後に、この変換を屋内 AP の相対位置に適用することでそれらの絶対座標を取得する。

提案手法では、バックグラウンドアプリが自動で収集した情報のみから屋内の AP 位置の推定が可能となるため、協力者は観測データ収集用のアプリをインストールしたスマートフォンを持ち歩くだけでよく、手動入力やタグ付け操作などをいっさい行う必要がなくなる。観測実施者がデータ収集時に明示的に現在位置や階情報を与える必要のないこのようなセンシングはゼロエフォートセンシングと呼ばれ [4], [5], 協力者の負担削減が不可欠なクラウドセンシングにおいて有効である。

提案手法による 3 次元の AP 位置推定精度を大学キャンパス内において評価した結果、平均位置誤差 8.8m で AP 位置を推定できることを確認した。

2. 関連研究

2.1 クラウドセンシングによる Wi-Fi モニタリング

都市環境における Wi-Fi モニタリングにクラウドセンシングを活用する様々な取り組みがなされている。Crowd-WiFi [6] はクラウドセンシングによって路側 Wi-Fi ネットワークを監視するための車載用ミドルウェアである。MCNet [7] は協力者のスマートフォンを用いてネットワークの QoS 情報を収集するシステムであり、ネットワークに追加のトラフィックを生じさせるアクティブなモニタリングによってネットワーク遅延やスループットなどの情報を取得しデータベースに蓄積する。MCNet に対して文献 [8] ではスマートフォンによるパッシブなチャンネルスキャンの

みからエンタープライズネットワーク内の AP ごとの負荷を調査するシステムを提案している。

2.2 AP 位置推定

スマートフォンの普及により観測データ収集が以前よりも容易になり、クラウドセンシングによる AP 位置データベースの構築を目的とした取り組み [9] がなされている。AP の位置推定に関する研究は入力データにおける観測位置がすべて既知である想定のもと、観測位置のすべて、あるいは一部が得られていないものの 2 種類に分類することができる。

すべての観測位置が既知である想定で、AP からのビーコンの RSSI をもとに AP の位置推定を行う手法として様々なものが提案されている [10]。たとえば、複数観測位置の重心や RSSI による重み付き重心を求めることでその AP の位置を推定する手法 [11] が存在する。伝搬損失モデルと RSSI に基づいて AP と観測位置間の絶対距離を推定し、三辺測量などの考えから AP 位置を特定する手法も数多く提案されており、RSSI と距離の関係を単純な線形関数として近似する方法 [12] やベイズ推定による伝搬損失パラメータ推定とガウス・ニュートン法による非線形性回帰を組み合わせた RSSI と伝搬損失、距離の関係の近似手法 [13] が存在する。最近ではレイリー・対数正規モデルによってマルチパス伝搬による小規模フェージングと大規模フェージングの両方の影響を考慮した手法 [14] も提案されている。InterArea [15] は上記のような複数観測位置からの AP 位置推定のための適切な観測位置の選択手法を提案している。また観測者の移動にともなう RSSI の変化やピークの検出に基づく AP 位置推定 [16], [17] も存在する。

RSSI 以外の情報を活用した AP 位置推定手法も存在する。たとえば電波の到来方向は AP 位置の推定に有用であり、AP 位置推定を目的として指向性アンテナを用いて電波の到来方向を取得する手法 [18] やスマートフォンを持った観測者が回転することによる RSSI の変化から電波の到来方向を疑似的に取得する手法 [19] が提案されている。また CSI (Channel State Information) を利用して AP の位置を推定する手法 [20] も提案されている。これらの RSSI 以外の情報を活用する手法は、AP の位置を比較的高い精度で推定可能であるものの、情報の取得のために特定のハードウェアやファームウェアの修正、観測時の特定の行動が必要であるため、汎用のスマートフォンを用いたクラウドセンシングの枠組みでの AP 位置推定には適していない。

上記の手法は観測位置情報が得られることが前提とされているが、屋内では GPS の精度が不安定であるため観測位置情報の取得が容易ではない。これに対して既存の屋内環境を想定した AP 位置推定では一般に Wi-Fi 以外の測位システムやセンサを利用して位置の手掛かりを取得する。T-PN [9] は Bluetooth や RFID といった他の電波に基づく

測位システムを活用し、観測位置推定と AP 位置推定を実現している。しかし、広範囲の AP 位置データベース構築を目的とする際に、対象となるすべての建物に位置推定の基準となるビーコンの設置やその他の測位システムの導入を行うことは現実的ではない。Zee [4] はデッドレコニングにより観測端末の屋内位置を推定し、AP 位置推定に活用する方法を示している。少数の観測位置情報からの AP 位置推定手法として EZ [21] や Serendipity [22] が存在する。これらの手法では位置情報のない観測から AP どのの相対的な位置関係を推定し、少数の位置が既知の AP や観測位置を手掛かりに AP の絶対位置を推定する。しかし、いずれの手法でも一定量の屋内の位置情報が必要であり、ユーザが手動で入力した観測位置、建物内の窓際や出入口などで部分的に得られる GPS による位置情報などが要求されている。UCMA [23] は観測位置情報をいっさい利用せず Wi-Fi スキャンとフロアプランのみから位置推定を行う手法であるが、部屋と通路の接続関係や階段の構造といった詳細なフロア情報を入力として要求する。

3. 想定環境および手法概要

提案手法による AP 位置推定の概要を図 1 に示す。提案手法は (1) 屋外観測データを用いた建物壁面上の仮想 AP 位置推定と (2) 屋内観測データを用いた相対的な AP の位置マップ生成、および (3) 建物壁面上の仮想 AP 位置を用いた AP 相対位置の絶対座標系への変換から構成されている。

提案手法の入力となるデータは、スマートフォンの Wi-Fi チャネルスキャンにより得られる周辺 AP からの Wi-Fi ビーコンの観測データであり、各ビーコン観測はその ESSID, BSSID, RSSI で構成されている。本論文では、あるチャネルスキャンを行った位置を観測位置と呼ぶ。各 AP はビーコンに含まれる BSSID (MAC アドレス) により識別する。建物壁面上の仮想 AP 位置推定に用いる屋外観測データには GPS により取得した観測位置の位置情報が含まれ、この位置情報の座標系を絶対座標系と呼ぶ。相対的な AP の位置マップ生成に用いる屋内の観測データには観測地点の位置情報は含まれない。ただし各観測位置ごとに、どの建物内部での観測であるかは判別可能であるとする。観測データの屋内外の判定および観測が行われた建物の特定には、既存の GPS に基づく屋内外判定手法 [24] の活用を想定している。

提案手法の最初のステップである屋外観測データからの建物壁面上の仮想 AP 位置の推定には、我々がすでに構築している屋外環境における Wi-Fi 電波強度地図生成手法 [3] を用いる。この手法は地理情報と電波伝搬シミュレーションを用いた屋外の Wi-Fi 観測データの補完を目的としており、データ補完の過程で、観測された屋内の AP について、屋外におけるその AP からの Wi-Fi ビーコン観

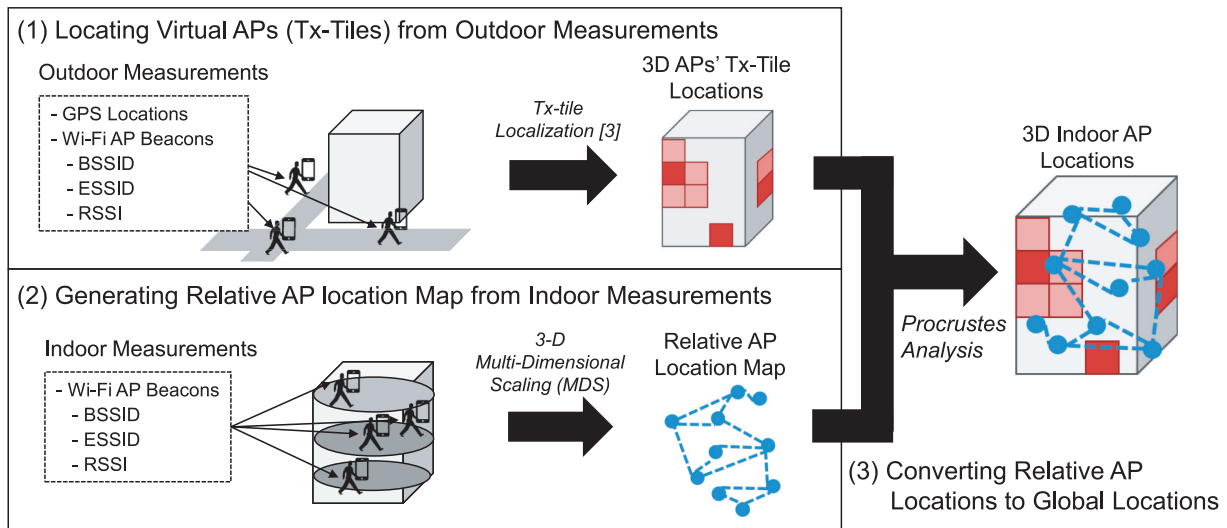


図 1 手法概要
Fig. 1 Method overview.

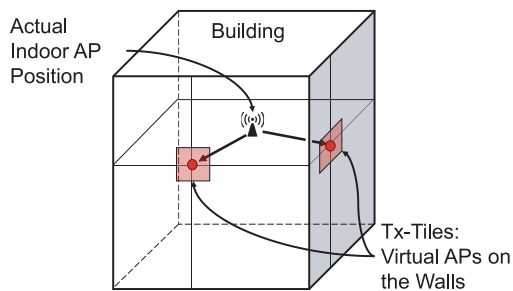


図 2 建物壁面上の仮想 AP 位置 Tx-Tile
Fig. 2 Tx-Tile: Virtual transmission source.

測データを用いて、実際の屋内位置ではなく建物壁面上の仮想的な AP の位置を推定する。この仮想的な AP 位置を我々は **Tx-Tile** と定義している (図 2)。Tx-tile は建物壁面上に存在するとし、屋内に設置されているある AP について、その AP と同様の屋外の RSSI のマップを生成する壁面上の仮想 AP である。提案手法ではこの Tx-Tile を屋内の AP の絶対位置推定のための位置の基準として利用する。Tx-Tile の位置推定手法については 4 章で述べる。

屋内観測データを用いた相対的な AP 位置マップ生成では、屋外の位置情報付きの観測とは別に収集された、屋内の位置情報のない観測データを基に多次元尺度構成法 (MDS) を利用して、建物の内に設置されている AP の相対的な位置関係 (相対 AP 位置マップ) を推定する。

MDS は、要素間の非類似度を考慮してそれを最もよく反映する低次元空間内の要素の位置を求める手法であり、一般に多次元のデータを 2 次元平面上にプロットし、データどうしの関係を可視化する目的で利用されるほか、センサーネットワークにおけるノードの相対位置推定 [25] などにも用いられる。提案手法では屋内の観測データをもとに、基準となるある 2 つの AP と AP 間の距離をもとにして、すべての AP 間の相対距離を計算し、この距離を非類

似度と見なして MDS を適用することで、AP どうしの相対的な位置関係を推定する。本研究では、文献 [22] で提案されている MDS による屋内 AP 位置の推定手法を拡張したものを利用する。文献 [22] の手法では MDS により 2 次元の AP 位置推定を行っているが、MDS で生成した相対 AP 位置マップを絶対座標系に変換するために、位置が既知の屋内観測位置の位置情報を利用している。本研究では、屋内の観測ではいささかの位置情報を必要としない手法を提案している。屋内の AP 観測データから AP 間の相対的な距離の尺度を計算し、それに 3 次元の多次元尺度構成法 (3D MDS) を適用することで 3 次元の相対 AP 位置マップを生成する。なお、提案手法では次元圧縮手法の中でも他手法の基本となり、かつパラメータを必要としないノンメトリック MDS を採用しているが、相対位置推定への適用可能性および有効性が既存研究で示されている Isomap [26] や LLE [27], Kernel PCA [28] といった要素間の非類似度を入力とする他の次元圧縮手法も採用可能である。屋内観測データからの相対 AP 位置マップの生成については 5.1 節で述べる。

屋内の相対 AP 位置マップを絶対座標系の位置に変換するために、推定済みの絶対座標系上の Tx-Tile を位置合わせの基準としたプロクラステス解析を利用する。プロクラステス解析は 2 つの対応が取れている点群に対して、回転、拡大縮小、および平行移動によって点群間の距離の二乗誤差が最小になるよう、一方の点群を他方の点群に重ね合わせる変換を求める手法であり、MDS により生成された相対的な要素の位置マップを絶対位置に変換する際にも用いられる。提案手法では、あらかじめ相対 AP 位置マップ内における Tx-Tile の位置を計算しておき、絶対座標系上の Tx-Tile 位置とそれに対応する相対 AP 位置マップ上の Tx-Tile 位置の組に対してプロクラステス解析を適用す

ることで、相対 AP 位置マップの上の位置を絶対座標系上の位置に変換するための変換を得る。この変換は回転・拡大縮小・平行移動から構成されており、これらを用いて相対 AP 位置マップ全体を絶対座標へ一様に変換することができる。相対 AP 位置マップの生成およびその絶対座標系への変換については 5.2 節で述べる。

なお屋外観測データからの推定ステップにおいて、Tx-Tile の代わりに直接屋内の AP 位置を推定できれば、その結果を屋内 AP の相対位置から絶対位置への変換に使うことも可能である。しかし、一般に屋外と屋内では電波伝搬の特性が異なり、特に屋内では壁・床の材質、内部の家具配置の影響を受けるため、屋外と異なり電波伝搬は建物固有の特性を示す。屋外から屋内の AP 位置を特定するには、屋外と屋内の両方の伝搬を考慮可能な位置推定が必要であるが、Tx-Tile 位置推定で利用している電波伝搬シミュレーションを活用しても、屋外環境と屋内環境を同時に扱うのは容易ではない。これに対し、伝搬環境の境界である壁面上の Tx-Tile を利用する提案手法では、電波伝搬に関して、屋外環境、建物ごとの屋内環境、さらに壁面 (Tx-Tile) の経路による電波減衰の 3 つを独立して考慮することができる。またクラウドセンシングによる広域の Wi-Fi データベースの構築という目的に対して、屋内と屋外を分離できることは、それぞれの環境ごとの位置推定の最適化や観測データの管理のしやすさにつながる。たとえば、ある建物内部において十分な量の新しい観測データが得られた際に、屋内・屋外を統合して AP 位置推定を行う場合にはすべての位置推定プロセスをやり直す必要がある、一方で提案手法のように屋内外を分離している場合には、以前に屋外データのみから推定した Tx-Tile の位置をそのまま利用し、屋内の相対 AP 位置と位置合わせのみを再度やり直すだけで推定 AP 位置の更新が可能である。

4. 屋外観測データからの Tx-Tile 位置推定

収集された屋外の観測データから、Tx-Tile の位置とその出力強度を推定する手続きは、以下の 3 ステップで構成される。

- (1) 建造物壁面上の Tx-Tile 存在区画の推定
- (2) シミュレーションによる RSSI と実観測 RSSI のフィッティングによる Tx-Tile 位置の推定
- (3) Tx-Tile の出力強度の推定

Tx-tile 推定は AP 単位で実行され、その入力となるのは推定対象となる AP を含む屋外の観測データとその位置情報である。以降では、すべての屋外の観測位置のうち、推定対象の AP_i のビーコンを受信できた地点を受信地点、受信できなかった地点を非受信地点と呼び、それぞれ o および \bar{o} で表す。同様に、 AP_i の受信地点の集合を O_i 、非受信地点の集合を \bar{O}_i で表す。推定においては電波伝搬シミュレーションと観測位置周辺の地理情報・建物の外郭・高さ

情報を利用する。

ある AP_i の Tx-Tile 存在区画は複数の観測位置での RSSI を用いた存在範囲推定により算出する。具体的には、各受信地点を中心とし、同地点の AP_i からの RSSI から推定される AP までの最大推定距離を半径とする球を求める。この球を存在領域と呼び受信地点ごとに求める。理想的には存在領域の内部に必ず AP が含まれるが、RSSI が反射などの影響を受けていたり、スマートフォンにおける RSSI 精度に機種や持ち方によるばらつきがみられるなど、必ずしも正確に距離を表現する高精度な RSSI を得られない場合が多い。そこで提案手法では、存在領域を示す球の半径の算出には自由空間伝搬損失に基づく距離推定を採用し、存在領域に AP が含まれる可能性をなるべく大きくする。同時に、周囲の建造物壁面をタイル状に分割し、複数の受信地点から推定される存在領域の球群と最も多く交差するタイルを Tx-Tile 存在区画とすることで、複数地点からの信頼度を考慮した推定を行う。実際に AP が存在しない建物上のタイルは、前述の自由空間伝搬損失に基づく距離推定によって、ある地点から見た存在領域に含まれることがあっても、複数地点から見た存在領域の共通部分には含まれないことが多いため、そのような方針を採用している。

前述のように、なるべく AP を存在領域の球に含み、かつ球半径をできるだけ抑制できるよう、RSSI から球半径を求めるために自由空間伝搬損失を利用する。自由空間伝搬損失は送信機と受信機間に物体が存在しない自由空間における信号強度減衰量を表すものであり、都市環境では障害物や様々なノイズの影響により実際の伝搬損失は自由空間伝搬損失よりも大きいことが多いため、自由空間伝搬損失により単純推定した AP と受信地点間の距離は実際の距離よりも大きくなりがちであると考えられる。式 (1) から送受信機間の距離 d (m) を求める。ここで、 P_r は受信電力 (mW)、 P_0 は送信電力 (mW)、 λ は波長 (m) である。

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_0}{P_r}} \quad (1)$$

以下、対象 AP のある受信地点 o における存在領域の球を $s(o)$ で表す。球 $s(o)$ の中心は受信地点 o であり、半径 r は式 (1) から以下の式 (2) で得られる。なお、 $v(o)$ は o における対象 AP からのビーコンの RSSI (mW)、 λ は波長である。

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{10^{-2}}{v(o)}} \quad (2)$$

都市部における 2 つの AP と 258 の観測地点でのデータでは、送信電力 P_0 を -20 dBm としたとき、約 90% の受信地点において推定距離が実際の距離より大きくなった。この推定距離を用いた場合、どのような場合も必ずすべての AP を含むわけではないが、球半径の大きさと包含率のトレードオフから経験的にこの値を球半径の計算に用いる。

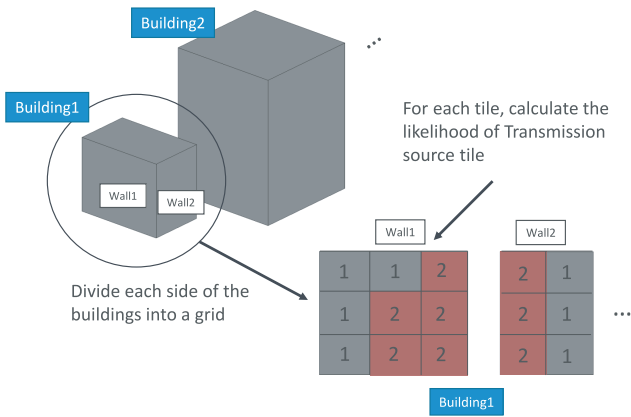


図 3 建造物壁面のタイル
Fig. 3 Tiles of building.

また本手法では、観測位置のうちビーコンを観測できなかった非受信地点の情報を利用し、存在領域とは逆に、ある AP が存在しないと考えられる非存在領域を求める。建物壁面に面する観測位置において、対象 AP のビーコンが観測できなかった場合、その建物壁面の観測位置近くの領域に Tx-Tile が存在する可能性は低い。このことから、非受信地点ごとに、AP が存在しない領域（非存在領域）を、存在領域と同様に球で表現する。以下、非受信地点 \bar{o} から求められる非存在領域を $\bar{s}(\bar{o})$ で表し、 $\bar{s}(\bar{o})$ の半径は経験的に 10 m とする。

この半径を大きくした場合、後述するシミュレーションの試行回数が削減され、Tx-tile にかかる時間が短縮されると期待される。一方で、ある AP について、実際には受信地点であるにもかかわらず都市環境におけるノイズなどの影響により非受信地点となった観測位置が存在する場合は、その誤った非受信地点による非存在領域のために Tx-Tile 位置の誤差が大きくなる可能性がある。

AP_i のすべての受信地点と非受信地点から求めた存在領域の集合 $S_i = \{s(o) \mid o \in O_i\}$ と非存在領域の集合 $\bar{S}_i = \{\bar{s}(\bar{o}) \mid \bar{o} \in \bar{O}_i\}$ をもとに建物壁面上の AP_i の Tx-Tile 存在区画を推定する手法を述べる。まず周囲の建物の壁面を図 3 のようにタイル状に分割し、タイル t ごとに、タイル内部に Tx-Tile が存在する尤度 $\mathcal{L}(t)$ を式 (3) により求める。

$$\mathcal{L}(t) = \sum_{s \in S_i} \text{intersects}(t, s) - \sum_{\bar{s} \in \bar{S}_i} \text{intersects}(t, \bar{s}) \quad (3)$$

ただし、

$$\text{intersects}(t, s) = \begin{cases} 1 & (\text{タイル } t \text{ が球 } s \text{ に含まれる}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

このように周辺建造物のすべてのタイルについてその尤度を求め、最大尤度のタイル（一般には複数）を Tx-Tile の存在区画とする。

次に、複数のタイルで構成される Tx-Tile 存在区画のな

表 1 Tx-Tile 位置推定の際のシミュレーションパラメータ
Table 1 Simulation parameters used for Tx-Tile localization.

| Parameters | Values |
|----------------------------|-------------------------------|
| Simulator | Scenargie |
| Propagation Module | Fast Urban Propagation Module |
| Pathloss Calculation Model | Triple Path Geodesic |
| Transmission Power | -10 dBm |
| Max Signal Propagation | 100,000 km |
| Antenna Pattern | Isotropic Antenna |
| City Model | Open Street Map |

かから、実際に Tx-Tile 位置を決定する。存在区画内部で Tx-Tile 位置を変化させ、それぞれにおいて Tx-Tile 位置の中心に AP があるように設定し、電波伝搬シミュレーションを行う。各シミュレーションにおいて、実観測データとして得られているすべての受信地点の RSSI とシミュレーションで得られた同地点上の RSSI を比較し、最小差の Tx-tile 位置を当該 AP の Tx-Tile 位置とする。なお本研究では電波伝搬シミュレータとして Scenargie [29] を用いる。シミュレーションの設定を表 1 に示す。

Tx-Tile の決定手順の詳細は以下のとおりである。まず Tx-Tile の存在区画内のタイルごとに、タイルの中心に AP を設置したシミュレーションを実行し、シミュレーションの出力である屋外の RSSI の分布（電波強度地図）を存在区画内のタイルの数だけ取得する。以下、Tx-Tile 位置 p に対し取得した電波強度地図を m_p と表す。また、受信地点 o での観測 RSSI $v(o)$ に対し、同地点における電波強度地図 m_p 上のシミュレーションによる RSSI を $\hat{v}_{m_p(o)}$ で表す。各電波強度地図 m_p について、式 (4) により受信地点で得られている観測データとの誤差 ($E(m_p)$ で表す) を計算し、 $E(m_p)$ を最小化する p を Tx-Tile の位置として決定する。

$$E(m_p) = \frac{1}{|O_i|} \sum_{o \in O_i} |\hat{v}_{m_p(o)} - v(o)| \quad (4)$$

Tx-Tile 存在区画が建造物の複数壁面にわたる場合は、各壁面について 1 つの Tx-Tile を設定し、考えられる Tx-Tile の位置のすべての組合せに対して、シミュレーションにより電波強度地図を求め、式 (4) を最小化する複数 Tx-Tile の組合せを Tx-Tile の位置として決定する。

最後に、 AP_i の Tx-Tile 位置における電波の出力強度 TxTile_TxPower_i を決定する。Tx-Tile の位置の決定方法と同様に、出力強度を変化させシミュレーションを行い、得られる電波強度地図の中で式 (4) を最小化する出力強度を当該 Tx-Tile の出力強度とする。出力強度を -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10 dBm の 7 パターンから順に選択してシミュレーションを実行し、結果として得られる電波強度地図のうち式 (4) を最小化するものを AP_i の電波強度地図として出力する。また、そのときの選択していた出力強度を AP_i の Tx-Tile の出力強度 TxTile_TxPower_i として決定す

る。位置の決定方法と同様に、ある AP について Tx-Tile が複数存在する場合は、すべての Tx-Tile の出力強度の組合せについてシミュレーションを行い、最適な組合せを選択する。

5. 屋内観測データによる AP 位置推定

Tx-Tile 位置と屋内観測データを用いた AP 位置推定手法について述べる。屋内観測データから推定対象の AP どうしが相対的にどのくらい離れているのかを表す相対距離（距離の非類似度）を求め、その相対距離に 3D MDS を適用することで 3 次元の相対 AP 位置マップを生成する。さらに、相対 AP 位置マップ内の Tx-Tile 位置を推定し、その位置とすでに得られている絶対座標系上の Tx-Tile 位置の組合せを用いて、相対 AP 位置マップから絶対座標系への座標変換を得る。本節では屋内で得られた観測を k とし、観測 k において得られた AP _{i} からのビーコンの RSSI を $v_{(k)i}$ と表記する。

前処理として、ある建物内における観測において、隣接する建物内に設置されている AP のビーコンを偶然に観測する場合を考慮し、屋内で観測された全 AP から、実際にその観測を行った建物内に設置されている AP を特定する。提案手法では屋内で観測されている RSSI の最大値が一定の閾値 TH_{IN} を超えているものをその建物内の AP とし、位置推定の対象とする。

5.1 3D MDS による相対 AP 位置マップの生成

MDS により相対 AP 位置マップを求めるためには、観測された任意の AP 間の相対距離が必要である。AP _{i} と AP _{j} 間の相対距離を $p_{i,j}$ で表し、相対距離の行列を $\mathbf{D} = [p_{i,j}]$ とする。また屋内の観測 k の得られた位置と AP _{i} の位置の相対距離を $p_{(k)i}$ で表す。2 つの AP の相対距離が大きいかほど、実際の絶対座標系上でも AP どうしが離れていることを意味する。本手法では文献 [22] で提案されている、屋内観測データ内の RSSI の最大値 MAX_{RSSI} と最小値 MIN_{RSSI} に基づいて相対距離を 1~ Q の Q 段階で求める動的な相対距離を利用する。RSSI が $v_{(k)i}$ である観測 k と AP _{i} との相対距離 $p_{(k)i}$ を式 (5) に示す。

$$p_{(k),i} = \lfloor 10^{f \log_{10}(Q+1)} \rfloor \quad (5)$$

ただし、

$$f = \frac{\text{MAX_RSSI} - v_{(k)i}}{\text{MAX_RSSI} - \text{MIN_RSSI}}$$

$$p_{(k),i,j} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{p_{(k)i}^2 + p_{(k)j}^2 - 2p_{(k)i}p_{(k)j} \cos \theta} d\theta \quad (6)$$

ある観測 k から見たときの AP 間の相対距離 $p_{(k),i,j}$ を式 (6) で求める。この式は観測 k の位置を中心とする半径

$p_{(k)i}$ と半径 $p_{(k)j}$ の 2 つの円を考えたとき、それぞれの円上に一樣に存在する任意の 1 点どうしがとりうる距離の期待値を表す。すべての観測から推定されるその AP 間の相対距離 $p_{i,j}$ はある観測 k から見たときの AP 間の相対距離 $p_{(k),i,j}$ を用いて $p_{i,j} = \min_k \{p_{(k),i,j}\}$ で求められる。

またどの屋内観測においても同時に観測されていない AP 間の相対距離は上記の方法で求められないため、ノードが AP、エッジの重みが AP 間の相対距離であるグラフにおける、AP 間の最短経路の累積重みをその相対距離に用いる。

以上のようにして生成されるすべての AP どうしの相対距離の行列 \mathbf{D} に対して、さらに Tx-Tile とその Tx-Tile に対応する AP 間の相対距離を計算し追加する。これにより相対距離行列に対して 3D MDS を適用し相対 AP 位置マップを生成した際に、相対 AP 位置マップ上での Tx-Tile の位置を求めることが可能となる。これは後述するように、相対 AP 位置マップ上の Tx-Tile 位置と絶対座標系上の Tx-Tile 位置を基準にして、相対 AP 位置マップから絶対座標系への変換を得るためである。

Tx-Tile とその Tx-Tile に対応する AP 間の相対距離は次のようにして求める。まず Tx-Tile が推定済みである AP _{i} について、4 章で推定したその Tx-Tile の出力強度 TxTile_{TxPower _{i}} と、事前定義のパラメータである AP _{i} の出力強度を AP_{TxPower} を用いて Tx-Tile と AP 位置の相対距離を計算する。ここで仮に Tx-Tile 位置で屋内観測が得られたとすると、AP _{i} からの RSSI はおよそ $v_{(\text{TxTile})i} = \text{TxTile_TxPower}_i - \text{AP_TxPower}$ と見なせる。この仮想的な RSSI を式 (5) に代入することで、Tx-Tile 位置から AP _{i} までの相対距離 $p_{(\text{TxTile}),i}$ が求まる。また Tx-Tile 位置から Tx-Tile までの相対距離 $p_{(\text{TxTile}),\text{TxTile}}$ は 0 と見なせるので、得られた 2 つの値を用いて式 (6) から AP _{i} とその Tx-Tile 間の相対距離を求めることができる。

屋外の観測から Tx-Tile が推定されているすべての AP について、以上の手続きにしたがい AP と Tx-Tile 間の相対距離を計算し、相対距離行列に追加する。なお、それらの AP について、仮想的な RSSI $v_{(\text{TxTile})i}$ をあらかじめ求めておき、これらの値も式 (5) の相対距離計算の際に用いる MAX_{RSSI} と MIN_{RSSI} の導出に利用する。また、同時に観測されていない AP 間の相対距離の補完と同様に、値が定まっていない任意の AP と任意の Tx-Tile 間の相対距離も最短経路の重みで補完する。

このようにして得られた全 AP および Tx-Tile 間の相対距離行列 \mathbf{D}' に対して 3D MDS を適用することで、各 AP の 3 次元の相対 AP 位置が得られる。相対 AP 位置マップ上での AP _{i} の位置を \mathbf{l}_i 、AP _{i} の Tx-Tile が存在する場合はその Tx-Tile の位置を \mathbf{t}_i と表す。

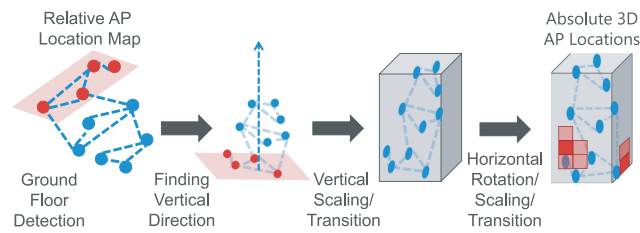


図 4 垂直方向と水平方向の位置合わせによる相対位置の絶対位置への変換

Fig. 4 Transformation of relative position into absolute position by vertical and horizontal point matching.

5.2 相対 AP 位置マップの絶対座標系への変換

上述の手法により生成された相対 AP 位置マップは単に AP どちらの相対的な位置関係を表すものであり、実際のマップ全体の向きや絶対位置、拡大縮小率は定まっていない。そこで相対 AP 位置マップ上の Tx-Tile 位置と絶対座標系上の Tx-Tile 位置の位置合わせによって相対 AP 位置マップから絶対座標系への変換を求める。屋外からの観測で Tx-Tile が推定されている AP の数を n とし、Tx-Tile が存在する任意の AP_i について、絶対座標系でのその AP_i の Tx-Tile 位置を gt_i とする。Tx-Tile は建物壁面の領域であるが、ここではその重心の 1 点を Tx-Tile 位置としている。

まず単純な相対 AP 位置マップから絶対座標系への変換の求め方について説明する。絶対座標系上の 3 次元点群 $\{gt_i\}_i^n$ と相対 AP 位置マップ上の 3 次元点群 $\{lt_i\}_i^n$ に対しプロクラステス解析を適用することによって、相対 AP 位置マップの座標系から絶対座標系に変換するための拡大縮小量 s 、回転行列 \mathbf{R} および平行移動ベクトル t が得られる。この単純な方法では、 AP_i の絶対座標系上の位置 g_i は式 (7) により求められる。なおベクトル x の転置を x^T と表す。

$$g_i^T = s \cdot \mathbf{R} \cdot l_i^T + t \quad (7)$$

しかし屋内環境においては、建物外部を経由する伝搬経路の存在や床・天井と室内壁の材質の違いから、電波の距離に対する減衰量は垂直方向と水平方向で一般に異なる。そのため、水平・垂直方向の相対距離を同一の尺度を用いて RSSI から計算し、その相対距離を基に生成した相対 AP 位置マップの水平・垂直方向に対して、同一の割合の拡大縮小を適用して絶対座標へ変換することは適切ではない。

そこで、提案手法では相対 AP 位置の絶対座標への変換において、垂直方向の変換と水平方向の変換を分離する。垂直方向および水平方向の変換を含めた相対 AP 位置の絶対座標への変換は図 4 に示すように大きく分けて 4 ステップで行われる。まず相対 AP 位置マップ内における建物の 1 階の平面を検出し、次にその 1 階平面を利用して相対 AP 位置マップ全体の垂直方向を決定する。その後垂直方向について、拡大縮小と平行移動による位置合わせを行い、最

後に水平方向の回転・拡大縮小・平行移動による位置合わせを行う。

最初の相対 AP 位置マップ上での 1 階を表す平面の検出のために、まず 1 階に設置されていると見なせる AP を推定する。ここでは屋外の観測データにおいて、観測されている最大 RSSI が一定の閾値 TH_{1F} を上回るものを、1 階に設置されている AP とする。そして、相対 AP 位置マップ上での 1 階の AP の点群に対して平面検出を適用し、得られた平面が 1 階平面であるとする。なお相対 AP 位置マップ上の Tx-Tile は以上の手続きの対象としない。平面の検出では外れ値による影響を抑えるため、最小二乗による平面検出ではなく、RANSAC アルゴリズム [30] を用いる。

さらに回転後の、検出された 1 階の平面と水平面がなす角を最小とすような、3 次元の回転行列 \mathbf{R}_1 を求める。垂直方向での AP の順序が逆にならないよう、回転後の 1 階の AP の重心が全 AP の重心よりも高い位置に来る回転は除外する。

次に垂直方向の拡大縮小および平行移動について述べる。相対 AP 位置マップの垂直方向の位置合わせには建物の高さを利用する。垂直方向が決定された相対 AP 位置マップ上で、一番下にある AP 位置を絶対座標系での建物の 1 階の高さ MIN_H に同様に、最も上にある AP 位置を絶対座標系での建物の最上階の高さ MAX_H に割り当てるような平行移動と拡大縮小による変換を求める。回転 \mathbf{R}_1 適用後の相対 AP 位置 $\{\mathbf{R}_1 \cdot l_i\}_i$ のうち、最も低い Z 座標を min_z 、最も高い Z 座標を max_z とすると、垂直方向の平行移動を表すベクトル t_z は式 (8) で求められる。

$$t_z = (0, 0, min_z - MIN_H)^T \quad (8)$$

また垂直方向の拡大縮小の値 s_z は式 (9) で求められる。

$$s_z = \frac{MAX_H - MIN_H}{max_z - min_z} \quad (9)$$

回転 \mathbf{R}_1 による変換後の相対 AP 位置マップ上の Tx-Tile 位置の点群と絶対座標系上の Tx-Tile 位置の点群という対応が取れた 2 点群に対して、2 次元のプロクラステス解析を適用することで、座標返還のための水平方向の拡大縮小量・回転行列、平行移動ベクトルを得る (図 5)。

このときすべての Tx-Tile を用いるのではなく、Tx-Tile 推定で得られた電波強度地図の精度が高く、Tx-Tile の位置推定精度も高いと考えられる Tx-Tile のみを用いる。4 章で求めた AP_i の電波強度地図を式 (4) により評価し得られた電波強度地図の誤差が小さい順に AP_i をソートする。j 番目に誤差が小さい Tx-Tile の相対 AP 位置マップ上での座標、絶対座標系上での座標をそれぞれ $lt_{(j)}$ 、 $gt_{(j)}$ と表す。K (> 0) をプロクラステス解析に利用する Tx-Tile の個数を示すパラメータとし、点群 $\{\mathbf{R}_1 \cdot lt_{(j)}\}_{j=1}^K$ と点群 $\{\mathbf{R}_1 \cdot gt_{(j)}\}_{j=1}^K$ の X 座標と Y 座標のみを用いた 2 次元のプロクラステス解析によって水平方向拡大縮小量 s_{xy} 、回

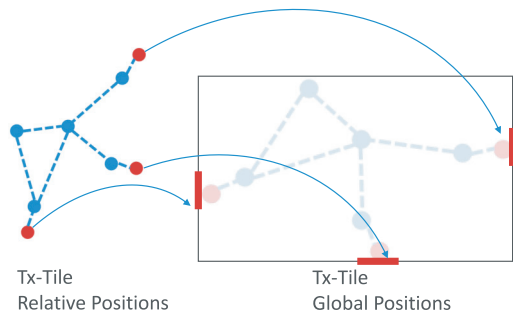


図 5 相対 AP 位置マップ内の Tx-Tile 位置と絶対座標系の Tx-Tile 位置によるプロクラステス解析

Fig. 5 Procrustes analysis with relative Tx-Tile positions and absolute Tx-Tile positions.

転行列 \mathbf{R}_2 , 平行移動ベクトル t_{xy} が得られる. \mathbf{R}_2 と t_{xy} は Z 座標に変化を加えない 3 次元の行列とベクトルであるとする.

以上により, 相対 AP 位置マップ上の座標 l_i である AP_i の絶対座標系上での位置 g_i^T は式 (10) により求められる.

$$g_i^T = s_{xy} \cdot \mathbf{R}_2 \cdot (s_z \cdot (\mathbf{R}_1 \cdot l_i^T) + t_z) + t_{xy} \quad (10)$$

6. 実験と評価

6.1 実験環境と収集データ

提案手法による AP の位置推定精度を評価するため, 大阪大学キャンパス内の建物において実験を行った. 図 7 に示すように AP1 から AP8 までの 8 基の AP を建物内部に設置した. AP1, AP2 は建物 1 階, AP3 から AP7 はそれぞれ B 棟の 2 階から 7 階に設置している. Wi-Fi ビーコン観測用の Android アプリケーションを作成し, 当該建物周辺の計 215 の観測位置において屋外での観測データを収集した. 屋外の観測位置を図 6 に示す. 屋外観測位置は GPS により得られた値を利用している. また同アプリケーションを用いて建物内部の計 367 地点の屋内観測データを収集した. 建物内部には設置した 8 基の AP 以外の AP も多数設置されているため, 屋内での観測データに含まれる AP のうち, 観測された RSSI の最大値が -60 dBm 以上であるものを, その建物内に設置されている AP であるとし, 設置した 8 基を含む該当する 162 基の AP を位置推定の対象として提案手法を適用した. 観測データの収集端末として当該アプリケーションがインストールされた Android 7.0 の LG Nexus 6P を利用した.

6.2 位置推定精度

屋内 AP 位置推定の際のパラメータを $Q = 7, K = 40, TH_{1F} = -60, AP_TxPower = 0$ としたときの, 各 AP の Tx-Tile 位置と実際の AP 位置との誤差を表 2 に, 提案手法による AP 位置の推定誤差を表 3 に示す. 屋外の観測データのみから推定した Tx-Tile の平均位置誤差は 18.0 m であり, 水平方向誤差が 13.3 m, 垂直方向誤差が 10.1 m で

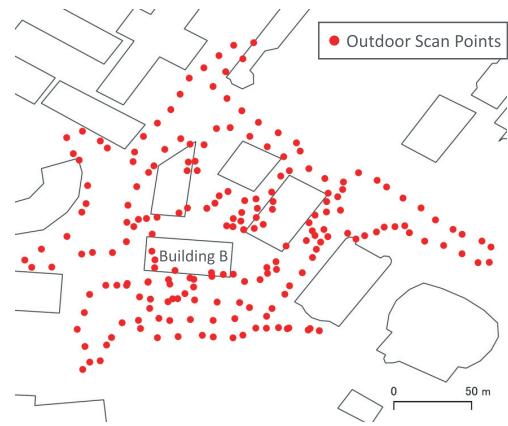


図 6 屋外観測位置

Fig. 6 Outdoor measurement points.

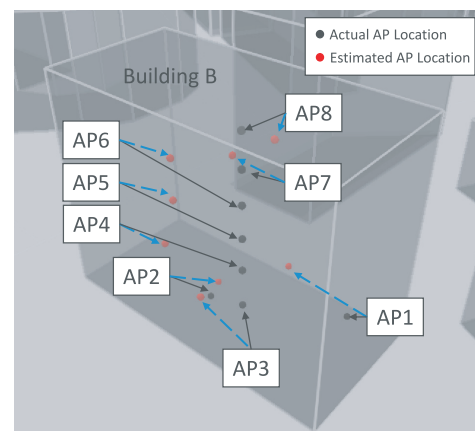


図 7 AP 設置箇所および推定位置

Fig. 7 Actual and estimated 3-D AP locations.

表 2 Tx-Tile 位置と AP 位置の距離 (m)

Table 2 Distances between AP position and Tx-Tile position (m).

| | 水平位置誤差 | 垂直位置誤差 | 3D 位置誤差 |
|---------|--------|--------|---------|
| AP1 | 18.3 | 0.5 | 18.3 |
| AP2 | 17.5 | 0.3 | 17.5 |
| AP3 | 9.9 | 4.7 | 11.0 |
| AP4 | 9.9 | 10.7 | 14.6 |
| AP5 | 9.9 | 10.1 | 14.1 |
| AP6 | 9.9 | 15.1 | 18.1 |
| Average | 13.3 | 10.1 | 18.0 |

あった. ただし Tx-Tile は建物壁面上の仮想的な AP であり AP 位置そのものを表すわけではないため, 一定量の誤差は生じるものである. 提案手法全体によって推定された AP の平均位置誤差は 8.4 m, 水平方向誤差が 2.1 m, 垂直方向誤差が 8.4 m であった. なお上位階に設置した AP7 と AP8 は屋外でビーコンを観測できなかったため, Tx-Tile は推定されていない. 屋内の推定対象 AP 162 基のうち, 屋外でビーコンが観測され Tx-Tile が推定されたものは 60 基であった.

表 3 推定 AP 位置誤差 (m)

Table 3 AP position estimation error (m).

| | 水平位置誤差 | 垂直位置誤差 | 3D 位置誤差 |
|---------|--------|--------|---------|
| AP1 | 10.7 | 3.8 | 11.3 |
| AP2 | 2.9 | 0.5 | 3.0 |
| AP3 | 5.7 | 2.6 | 6.2 |
| AP4 | 12.3 | 0.2 | 12.3 |
| AP5 | 11.4 | 1.5 | 11.5 |
| AP6 | 11.1 | 3.0 | 11.5 |
| AP7 | 8.4 | 2.6 | 8.8 |
| AP8 | 4.8 | 2.6 | 5.5 |
| Average | 8.4 | 2.1 | 8.8 |

表 4 1 時間あたりのアプリ消費電力 [mAh]

Table 4 Battery consumption per hour [mAh].

| | 提案手法用アプリ | Google Map app |
|-----------|----------|----------------|
| CPU | 35.4 | 218.7 |
| Wi-Fi | 6.5 | 3.2 |
| Bluetooth | 0.0 | 0.3 |
| GPS | 5.9 | 6.3 |
| Sensors | 0.06 | 0.07 |
| 合計 | 0.06 | 0.07 |

6.3 観測アプリの消費電力

観測アプリによる消費電力量を測定した。バッテリー容量が 3,450mAh である Nexus 6P を測定端末として利用し、Android Debug Bridge [31] を用いて当該アプリによるバッテリー電力消費量を調べた。なお観測データのアップロードは電源接続時に行う想定であるため、サーバとの通信による電力消費は測定の対象外とした。比較対象として、GPS や Wi-Fi スキャンを利用する地図アプリのうち広く利用されている Google Map アプリを同じ状況で動作させた場合の消費電力を測定し、提案手法のための観測アプリの実行が、クラウドセンシング協力者にとって消費電力的に負担が軽いといえるレベルであることを確認した。

表 4 に消費電力の測定結果を示す。提案手法のアプリは 1 時間につき CPU・Wi-Fi・Bluetooth モジュール・GPS・その他センサ類全体で 47.86mAh の電力を消費し、その間に屋内と屋外合わせて 890 地点での観測データを収集した。同経路を Google Map アプリを起動した状態で同様に移動した際の Google Map アプリの消費電力は全体で 228.57mAh であった。GPS による消費電力は 2 つのアプリで同様であるものの、観測アプリが 1 時間あたりに消費する電力は端末のバッテリー容量の約 1% 程度であり、これはユーザにとってバックグラウンド実行し続けて差支えない程度であるといえる。

低消費電力での観測アプリが実現可能な理由として、提案手法が想定している観測データの収集においては、モバイル端末のオペレーティングシステム (OS) が持つ電力消費の最適化機能の恩恵を受けやすいことがあげられる。

Android の場合は、処理内容や利用するセンサ、端末の電源接続の有無や、端末の装着状態、ユーザの移動状況など OS やハードウェアレベルで管理される端末状態などに基づいて、OS がアプリのバックグラウンド処理の実行タイミングを制御する [32]。また Wi-Fi スキャンは、取得のタイミングに要求がなければ OS 自身が定期的に行う低電力 Wi-Fi スキャンの結果をそのまま利用することができる [33]。このような最適化が提案手法のアプリで有効であるのは、前提とする観測データに、観測のタイミングや時間、観測どうしの間隔についての要求がなく、すべてのバックグラウンド処理の実行タイミングを OS に委ねることができるためである。既存手法の多くが観測位置を得るために採用しているデッドレコニングは、継続的な位置のトラッキングのために高頻度でのセンサデータの読み取りを必要とし、OS によってすべての処理やデータ取得のタイミングが決定されるこれらの最適化の恩恵を受けることは容易ではない。

6.4 パラメータの影響

提案手法のパラメータによる位置推定精度への影響を調査した。K = 40, TH_{1F} = -60, AP_TxPower = 0 と固定し、相対距離の段階数であるパラメータ Q を 3 から 10 に変化させたときの推定誤差の変化を図 8(a) に示す。Q を変更した場合でも位置推定誤差の大きな変化は見られなかった。この点については、提案手法において利用した相対距離を定義している文献 [22] でも同様の結果である。

次に Q = 7, TH_{1F} = -60, AP_TxPower = 0 と固定し、プロクラスティクス解析による位置合わせに利用する Tx-tile の数を表すパラメータである K を 5 から 45 まで 5 単位で変化させたときの推定誤差の変化を図 8(b) に示す。位置合わせに利用する電波強度地図の精度が高い Tx-Tile を数個から 25 個まで増やしていくと徐々に推定精度が低下し、そこからさらに K を増やしていくと逆に精度が上昇する傾向が見られた。これは、K が十分に小さい場合は位置が正確に推定されていると見なせる Tx-Tile のみを用いるため、位置合わせの精度が向上し、逆に K を増やすと位置推定精度の悪い Tx-Tile が位置合わせに利用されるため絶対 AP 位置の推定精度が低下し、そこからさらに K を増やした場合には誤差の大きい Tx-Tile のずれの影響がほかの多数の Tx-Tile によって位置合わせの際に打ち消されるため、AP 位置推定精度が一定の値に収束するためだと考えられる。したがって、都市環境で実施する際には K はとれる値のうち十分に大きな値に設定することができる。

さらに Q = 7, K = 40, AP_TxPower = 0 と固定し、AP が 1 階にあるかどうかの検出に利用する RSSI の閾値である TH_{1F} を変化させたときの推定誤差の変化を図 8(c) に示す。TH_{1F} が -60 dBm のときに精度が最良となり、さらに TH_{1F} を上昇させると精度が徐々に低下する傾向が

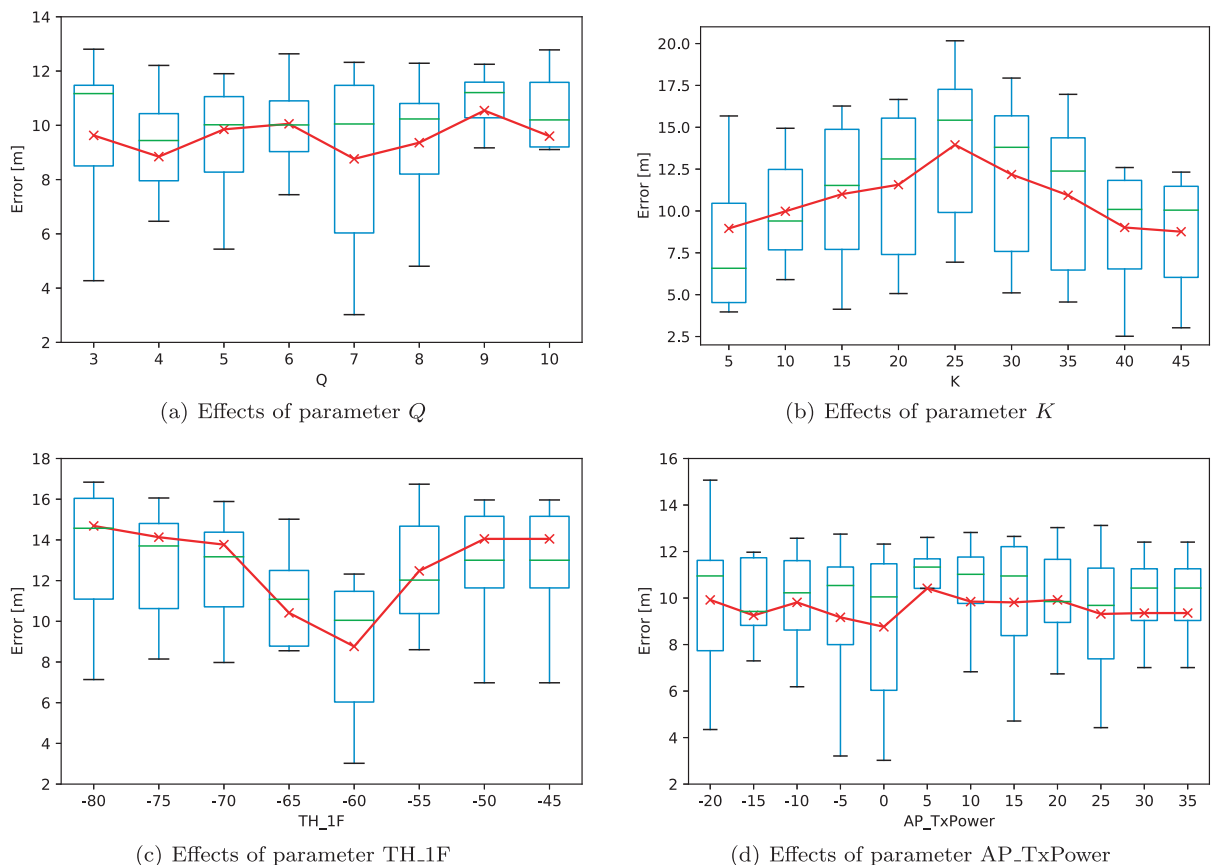


図 8 パラメータの AP 位置推定精度への影響

Fig. 8 Effects of parameters.

見られた。これは、TH_{1F} が小さいと 1 階の AP の判定において誤検出が発生するため 1 階平面検出の精度が低下し、逆に十分に大きくなると 1 階の AP の検出漏れによって、平面検出精度が低下するためである。観測端末や環境によって TH_{1F} の適切な値は変化する。そのため都市環境においては、たとえばコンビニエンスストアに設置されている公衆 Wi-Fi AP などの Web 上でおよその位置が公開されている AP を利用して、屋外でのその AP からの RSSIなどを基準に観測端末種別やおおよその空間領域ごとに TH_{1F} を動的に設定することが適切である。

最後に $Q = 7$, $K = 40$, $TH_{1F} = -60$ としたときの、想定する AP の出力強度 AP_TxPower を変化させたときの推定誤差の変化を図 8(d) に示す。TH_{1F} を変化させても精度に大きな変化は見られなかった。これは AP とその Tx-Tile 間の距離は他の AP 間距離に対して相対的に小さいため、想定する AP の出力強度を変動させても、AP と Tx-Tile 間の相対距離に大きな影響を与えないためであると考えられる。したがってクラウドセンシングにより都市環境の AP 位置推定を行う際には、AP_TxPower はいくつかの AP で実測した値をもとに経験的に設定可能である。

6.5 推定 AP 位置に基づく端末フロアレベル推定

提案手法による 3 次元 AP 位置の有用性を示すため、そ

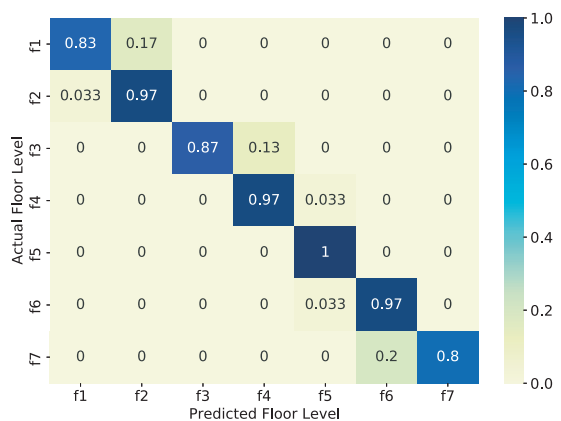


図 9 Wi-Fi クライアントのフロアレベル推定結果

Fig. 9 Floor level estimation result.

の活用例の 1 つとして Wi-Fi クライアントのフロアレベル推定の例を示す。スマートフォンなどの Wi-Fi クライアントが現在いる階の正確な推定は、商業施設での位置情報サービスやクライアントによる適切な接続先 AP 選択において重要である。提案手法による 3 次元 AP 位置推定では垂直方向の推定精度が特に高いことから、この AP 位置情報を Wi-Fi クライアントのフロアレベル推定に活用できる。

新たに同建物内の 210 地点（各階 30 地点）で収集した

各 Wi-Fi ビーコン観測データの観測位置のフロアレベルを 6.2 節の AP 位置推定の実験と評価で得られた 162 基の AP 推定位置を用いて推定した。各観測におけるビーコンのうち RSSI が最も高い 5 つの AP を選択し、それらの推定 AP 位置のうち高さの平均をとることで、その観測の高さを求めフロアレベルを取得した。階単位での推定精度を評価した結果を図 9 に示す。正解率 91% でクライアントが Wi-Fi ビーコン観測データを取得した階を推定可能であり、また推定誤差もたかだか 1 階分であるという結果が得られた。

7. おわりに

本研究ではクラウドセンシングによる AP 位置データベースの構築を目的とする新たな Wi-Fi AP の 3 次元位置推定手法を提案した。既存の屋内 AP 位置推定手法の多くは屋内観測の位置情報が必要であり、協力ユーザによる手動の位置情報の入力やバッテリー電力消費に課題のあるデッドレコニングの活用などが求められていた。これらの手法は協力ユーザの負荷を軽減することが不可欠なクラウドセンシングによる広域のデータ収集には適さない。提案手法では屋外と屋内の観測情報を組み合わせることにより、上述のユーザ負担のないゼロエフォートセンシングによる AP 位置推定を実現した。屋外の GPS 位置情報を基に推定した建物壁面上の仮想的な AP 位置を、屋内位置推定のための位置基準として活用することで、屋内の観測位置情報をいっさい用いずに屋内の AP 位置を推定する。

今後の課題として、今回の結果を基に実際の都市環境におけるクラウドセンシングにより収集されるデータを用いた提案手法の評価に取り組む予定である。提案手法自体の調査として、今回は相対 AP 位置マップの生成において次元圧縮手法の中でも最も単純な MDS を採用したが、他の手法を採用した際の AP 配置・分布と位置推定精度の関係、さらに比較的新しい次元圧縮手法である t-SNE [34] の適用可能性の調査を進める。また他手法との比較として、消費電力の観点の効率をより客観的に示すために、デッドレコニングと Wi-Fi スキャンを組み合わせた既存の屋内位置推定手法を実装し、精度と消費電力量・依存するセンサ種別について比較・評価を行う。

参考文献

[1] Department for Business innovation & Skills: *Global Innovators: International Case Studies on Smart Cities Smart Cities Study*, Vol.135 (2013).

[2] Fan, X., He, X., Xiang, C., Puthal, D., Gong, L., Nanda, P. and Fang, G.: Towards System Implementation and Data Analysis for Crowdsensing Based Outdoor RSS Maps, *IEEE Access*, Vol.6, pp.47535–47545 (2018).

[3] 天野辰哉, 梶田宗吾, 山口弘純, 東野輝夫, 高井峰生: クラウドソーシングと 3 次元電波伝搬シミュレーションの併用による効率的な Wi-Fi 電波データベース構築, 情報

処理学会論文誌, Vol.59, No.2, pp.450–461 (2018).

[4] Rai, A., Chintalapudi, K.K., Padmanabhan, V.N. and Sen, R.: Zee: Zero-Effort Crowdsourcing for Indoor Localization, *Proc. 18th Annual International Conference on Mobile computing and networking (MobiCom 2012)*, p.293 (2012).

[5] Gu, F., Blankenbach, J., Khoshelham, K., Grottke, J. and Valaee, S.: ZeeFi: Zero-effort Floor Identification with Deep Learning for Indoor Localization, *Proc. 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2019)* (2019).

[6] Wu, D., Liu, Q., Zhang, Y., McCann, J., Regan, A. and Venkatasubramanian, N.: CrowdWiFi: Efficient Crowdsensing of Roadside WiFi Networks, *Proc. 15th International Middleware Conference (Middleware 2014)*, pp.229–240 (2014).

[7] Rosen, S., Lee, S.J., Lee, J., Congdon, P., Mao, Z. and Burden, K.: MCNet: Crowdsourcing Wireless Performance Measurements through the Eyes of Mobile Devices, *IEEE Communications Magazine*, Vol.52, No.10, pp.86–91 (2014).

[8] Shi, J., Meng, L., Striegel, A., Qiao, C., Koutsonikolas, D. and Challen, G.: A Walk on the Client Side: Monitoring Enterprise Wifi Networks Using Smartphone Channel Scans, *Proc. 35th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2016)*, pp.1–9 (2016).

[9] Zhuang, Y., Syed, Z., Georgy, J. and El-Sheimy, N.: Autonomous smartphone-based WiFi positioning system by using access points localization and crowdsourcing, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol.18, pp.118–136 (2015).

[10] Nurminen, H., Dashti, M. and Piché, R.: A Survey on Wireless Transmitter Localization Using Signal Strength Measurements, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol.2017, No.2017, pp.1–12 (2017).

[11] Piché, R.: Robust Estimation of A Reception Region from Location Fingerprints, *Proc. 1st International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS 2011)*, pp.31–35 (2011).

[12] Koo, J. and Cha, H.: Localizing WiFi Access Points Using Signal Strength, *IEEE Communications Letters*, Vol.15, No.2, pp.187–189 (2011).

[13] Nurminen, H., Talvitie, J., Ali-Loytty, S., Muller, P., Lohan, E.S., Piche, R. and Renfors, M.: Statistical Path Loss Parameter Estimation and Positioning Using RSS Measurements in Indoor Wireless Networks, *the 3rd International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2012)*, pp.1–9 (2012).

[14] Shen, J., Huang, B., Tian, Y. and Zhao, L.: On the Reliable Localization of WiFi Access Points, *IEEE Access*, Vol.7, pp.90931–90940 (2019).

[15] Yang, X. and Chen, B.: A novel method for measurement points selection in access points localization, *Wireless Networks*, Vol.24, No.1, pp.257–270 (2018).

[16] Han, D., Andersen, D.G., Kaminsky, M., Papagiannaki, K. and Seshan, S.: Access Point Localization Using Local Signal Strength Gradient, *Proc. 10th International Conference on Passive and Active Network Measurement (PAM 2009)*, pp.99–108 (2009).

[17] Fang, Z., Haiyong, L.U.O., Hao, G. and Qijin, S.U.N.: An RSSI Gradient-based AP Localization Algorithm, *China Communications*, Vol.11, No.2, pp.100–108 (2014).

[18] Satoh, H., Ito, S. and Kawaguchi, N.: Position Estima-

tion of Wireless Access Point Using Directional Antennas, *Proc. 1st International Workshop on Location and Context-Awareness*, pp.144–156 (2005).

[19] Zhang, Z., Zhou, X., Zhang, W., Zhang, Y., Wang, G., Zho, B.Y. and Zheng, H.: I Am the Antenna-Accurate Outdoor AP Location using Smartphones, *Proc. 17th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2011)*, pp.109–120 (2011).

[20] Zheng, X., Wang, C., Chen, Y. and Yang, J.: Accurate Rogue Access Point Localization Leveraging Fine-grained Channel Information, *Proc. 2014 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS 2014)*, pp.211–219 (2014).

[21] Chintalapudi, K., Padmanabha Iyer, A. and Padmanabhan, V.N.: Indoor localization without the pain, *Proc. 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2010)*, p.173 (2010).

[22] Koo, J. and Cha, H.: Unsupervised Locating of WiFi Access Points Using Smartphones, *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol.42, No.6, pp.1341–1353 (2012).

[23] Jung, S.H., Moon, B.C. and Han, D.: Unsupervised Learning for Crowdsourced Indoor Localization in Wireless Networks, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.15, No.11, pp.2892–2906 (2016).

[24] Katsuda, E., Uchiyama, A., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: GPS 受信状態を用いた屋内外判定法, *IPSS SIG Technical Report Mobile Computing and Pervasive System (MBL)*, Vol.2011, No.18, pp.1–8 (2011).

[25] Shang, Y. and Rum, W.: Improved MDS-Based Localization, *Proc. 23rd IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2004)*, pp.2640–2651 (2004).

[26] Li, B., He, Y., Guo, F. and Zuo, L.: A novel localization algorithm based on isomap and partial least squares for wireless sensor networks, *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, Vol.62, No.2, pp.304–314 (2013).

[27] Singh, K.P., Bhai, R., Mishra, V., Nagar, P. and Kasinayal, J.: Localization in Wireless Sensor Network Using LLE-ISOMAP Algorithm, *IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pp.393–397 (2017).

[28] Essoloh, M., Richard, C., Snoussi, H. and Honeine, P.: Distributed localization in wireless sensor networks as a pre-image problem in a Reproducing Kernel Hilbert Space, *Proc. 16th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2018)*, pp.1–5 (2008).

[29] Space-Time Engineering, LLC.: Scenargie High Quality System Simulation Framework (2007), available from <http://www.spacetime-eng.com> (accessed 2019-04-19).

[30] Fischler, M.A. and Bolles, R.C.: Random Sample Paradigm for Model Consensus: A Apphcatlons to Image Fitting with Analysis and Automated Cartography, *Comm. ACM*, Vol.24, No.6, pp.381–395 (1981).

[31] Android Developers Documentation: Profile battery usage with Batterystats and Battery Historian (2020), available from <https://developer.android.com/topic/performance/power/setup-battery-historian> (accessed 2020-10-19).

[32] Android Developers Documentation: Optimize for battery life (2020), available from <https://developer.android.com/topic/performance/power> (accessed 2020-10-19).

[33] Android Open Source Project: Wi-Fi Preferred Network Offload Scanning (2020), available from <https://source.android.google.cn/devices/tech/connect/wifi-scan>

(accessed 2020-10-19).

[34] Maaten, L.V.D. and Hinton, G.: Visualizing Data Using t-SNE, *Journal of Machine Learning Research*, Vol.9, No.86, pp.2579–2605 (2008).

推薦文

本論文は、Wi-Fi のアクセスポイントの 3 次元位置推定に関して、GPS による位置情報が付与された屋外の RSSI 測定結果と位置情報が不明な屋内の RSSI 測定結果を利用した方式を提案している。本方式による精度向上は、様々な位置情報サービスの利便性の向上に寄与する有用な研究結果であり、本論文を情報処理学会論文誌に推薦する。

(モバイルコンピューティングとパーベイスブシステム
研究会主査 太田 賢)



天野 辰哉 (学生会員)

平成 28 年大阪大学基礎工学部情報科学研究科卒業。平成 30 年同大学大学院博士前期課程修了。平成 30 年同大学大学院博士後期課程入学。平成 30 年日本学術振興会特別研究員 DC1。クラウドセンシングによる都市環境の

Wi-Fi モニタリングに関する研究に従事。



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博士後期課程修了。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に関する研究に従

事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



東野 輝夫 (正会員)

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。現在、同大学大学院情報科学研究科教授。工学博士。分散シス

テム, 通信プロトコル, モバイルコンピューティング等の研究に従事。電子情報通信学会, ACM 各会員, IEEE Senior Member, 本会フェロー。