

クラウドセンシングによる 屋内 Wi-Fi AP の 3次元位置推定手法

天野 辰哉¹ 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹ 高井 峰生^{1,2}

概要：

本研究では、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から AP の 3次元位置推定を行う手法を提案する。提案手法では、まず屋外におけるビーコン観測データとその観測位置情報、周辺の 3次元都市モデルを基に電波伝搬シミュレーションを活用して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。さらに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 の相対的な位置マップを生成し、この相対的な AP 位置マップとグローバル座標上の仮想的な AP 位置の位置合わせを行うことで、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等を利用せずに屋内 AP 位置が推定できるため、協力ユーザに一切のデータ入力を求めないクラウドセンシングによる AP 位置データベースの構築が可能となる。提案手法を実装し大阪大学情報科学研究科周辺で実験を行った結果、屋内観測の位置情報を一切用いることなく、屋内 AP の平均位置誤差 8.4m で AP 位置を推定することができた。

1. はじめに

東京オリンピック・パラリンピック開催を 2020 年に控え、外国人観光客の増加が続いている。外国人観光客は Wi-Fi を利用する傾向にあり、総務省はその通信環境改善を促進するため、訪日外国人が我が国の世界最高水準の ICT を「サクサク」利用できる ICT 環境を実現することを旨としたアクションプラン「SAQ2 JAPAN Project」を 2014 年 6 月に公表した。ソフトバンクが全国 40 万の Wi-Fi アクセスポイント (AP) を訪日外国人向けに提供するなど、パブリックスペースにおける Wi-Fi の可用性向上やユーザビリティ強化に向けた動きが活発となっている。

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 AP の無秩序かつ過密な設置、モバイルルータの急増、ITS 車載器への Wi-Fi 搭載、マルチバンド Wi-Fi チップの増加などにより、AP 数とデバイス数は増加の一途を辿っており、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、IEEE802.11ax では動的キャリアセンス閾値調整 (Dynamic Sensitivity Control, DSC) および送信電力制御 (Transmit Power Control, TPC) を行うことが提唱されており、それらの制御がない場合と比べて 2 倍程度のスループットが達

成できる場合もあることが報告されている [1]。また、我々は IEEE802.11a/g/n など既存アーキテクチャの範疇で、各 AP の周波数再利用を自律的に効率化させることを目標に、干渉環境センシングのコンセプトに基づく AP チャンネル選択により過密干渉を制御する技術を開発している [2]。この手法では、高精度シミュレーションと機械学習をベースに、Wi-Fi の各チャンネルにおける IEEE802.11MAC フレームの観測から各 AP における被干渉レベルと通信性能を予測する関数を設計しており、各チャンネルのフレームセンシングにより、最も高い品質を提供可能と予想されるチャンネルを示唆することができる。しかし、これらを含めた既存の AP 間干渉回避技術の多くは固定設置型 AP 間の空間利用率を向上することに主眼を置いており、スマートフォンや車載器 Wi-Fi のような移動型 Wi-Fi クライアントや、モバイルルータのような移動型 AP などを含めた個々の通信品質の向上を直接目指したものではない。例えば移動型 Wi-Fi クライアントは AP の密設置によりカバーエリア拡大の利点が生じるものの、密設置環境の「Wi-Fi セル端」では多数の AP からの干渉波に晒されることによる CSMA 通信機会損失やフレーム損失が発生したり、さらにそれらクライアントが歩行や車両等で移動する場合には Wi-Fi セル間の水平ハンドオーバーが頻発する。そのような環境で、移動に応じて Wi-Fi チャンネル利用状況をスキャンし、トラフィック状況を推定した上で非輻輳チャンネルを有する AP

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² カリフォルニア大学ロサンゼルス校

を選択するためには、個々の AP への帰属とトラフィック監視を行う必要があり、現状の Wi-Fi アーキテクチャにおいてはオーバーヘッドとタイムラグが大きく非現実的である。本研究は都市環境において、AP、クライアント、モバイルルータ全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「通信環境コンテキスト」を提供するデータベースの構築を目的としている。

通信環境コンテキストの一つとして AP の位置情報は重要であり、AP の位置情報をクライアントの帰属制御に活用することが可能である。例えば、クライアントが 3 次元空間上における屋内の AP 位置を取得することができれば、ユーザの室内への出入りや階の移動を検出し、ユーザが特定の部屋・階にいる際には、その部屋・階に設置されている AP 以外への接続をスマートフォン端末側で遮断することで、誤った AP へ接続し Wi-Fi 通信品質が低下する状況の発生を防ぐことができる。また、AP 位置情報は屋内の AP 設置位置や使用周波数帯の決定といった無線ネットワークの管理にも有用であり、3 次元 AP 位置が得られることで、異なる階にある AP や隣接する建造物の AP から到来する電波によって生じる既設 AP 間の干渉状況の詳細な調査できより適切な AP 位置や使用周波数帯の決定が可能となる。また AP 位置情報は、AP 位置を屋内の位置の基準点としたユーザ端末位置推定にも適用可能であり、GPS が利用できない屋内環境下で、ユーザのいる場所・階の特定を行い、より高度なナビゲーションなどへの活用が期待されている。

これまでに AP からのビーコン観測データをもとに AP の位置推定を行う様々な手法が提案されている。特に近年は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や参加型センシングの枠組みを活用した AP 位置データベースの構築を目的とした取り組みもなされている。

その一方で、屋内では AP 位置推定に必要な測定端末の位置情報を得ることが容易ではないという問題がある。この問題に対して既存の屋内 AP 位置推定手法では、既知の AP を予め設置しておき位置の基準となる情報を得る、あるいは、デッドレコニングや RFID などのその他の測位システム、ユーザの手動入力などを活用し何らかの方法で観測位置を取得するといった方法が取られることが多い。しかし、建物内部への基準点となる AP の設置やその他測位システムの導入は多数の建物に対して実施することが困難であるため、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には適さない。またデッドレコニングにより屋内での端末位置を推定する方法では、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を常時取得する必要があるため、端末の電力消費が大きくなるため、協力ユーザの負担が大きくなる。またユーザが自分の位置を手動で入力することもユー

ザの負担が大きくなる要因であり、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な方法ではない。

そこで本研究では、クラウドセンシングを活用した都市広域の AP 位置データベースの構築を目的とし、AP 位置推定において協力ユーザに一切のデータ入力を求めず、また屋内の位置基準も利用せずに、完全なパッシブセンシングのみによる 3 次元 AP 推定手法を提案する。提案手法では、まず屋外におけるスマートフォンユーザによる 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電波伝搬シミュレーションを活用して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。次に屋内の観測データを収集し、その屋内観測データから観測した AP 同士の距離尺度を算出、この AP 間距離尺度を基に三次元多次元尺度構成法 (3D MDS) により、AP 同士の相対的な位置マップを生成する。そしてこの相対 AP 位置マップを屋外観測から推定した壁面上の仮想的な AP 位置にマッピングすることで、屋内の AP の絶対座標を得る。この手法により、バックグラウンドアプリが完全に自動で収集した Wi-Fi チャンネルスキャンの情報のみから建物屋内の AP 位置を推定が可能となるため、クラウドセンシングの協力ユーザは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一切行う必要がなくなる。

提案手法を実装し大阪大学情報科学研究科周辺で実験を行った結果、屋内観測位置情報やその他の屋内の位置基準を一切用いることなく、屋内 AP の平均位置誤差 8.4m で AP 位置を推定することができることを確認した。

2. 関連研究

過密な AP 設置に対し、Wi-Fi の干渉対策を目的とした様々な研究がなされている。[3] ではクロスレイヤ方式で送信電力の調整を行い、トラフィック負荷が高い AP の送信電力を大きくすべきであると結論付けている。また [4] では複数の AP が相互干渉する環境における分散型のチャンネル選択アルゴリズムとクライアントの AP 選択方法を述べている。これらのように既存の AP 間干渉回避技術の多くは固定設置型 AP 間の空間利用率を向上することに主眼を置いており、大局的な周波数利用効率化や収容 AP 数向上に寄与する。しかし、スマートフォンや車載機 Wi-Fi のような移動型 Wi-Fi クライアントや、モバイルルータのような移動型 AP などを含めた個々の通信品質の向上を直接目指したものではない。例えばクライアントが隣接するビル AP や建物の階層の AP といった、遠方の AP のビーコンを偶然に検知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「つながらない」状況を拡大してしまう状況も起こり得る。本研究は 3 次元都市環境において、AP、クライ

アント、モバイルルータ全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「通信環境コンテキスト」となる AP の 3 次元位置データベースの構築を目的としている。

通信環境コンテキストの一つとして AP の位置情報は重要であり、AP からの電波の受信信号強度 (RSSI) をもとに AP の位置推定を行う手法が研究されている。AP や基地局といったトランスミッタからの電波を、観測した位置の重心や RSSI による重み付き重心を求めることで、そのトランスミッタの位置を推定する手法 [5-7] が存在する。また複数の観測地点における RSSI に対して、AP 位置を定めたときの、実測 RSSI と推定 RSSI の誤差を最小にするような、AP 位置と対象空間上での電波伝搬の特性パラメータを探索することで、AP 位置を推定する手法 [8-11] が数多く存在する。さらに、[12] や [13] は観測者の移動に伴う RSSI の変化やピークを利用して AP の位置を推定する手法を提案している。

また RSSI 以外の情報を活用した AP 位置推定手法も存在する。例えば [14] は指向性アンテナを用いて電波の到来方向を取得し、AP の位置推定を行う手法を提案している。[15] では、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し、AP の位置推定に活用している。[16] では RSSI だけではなく、電波の位相を含む情報である CSI (Channel State Information) を利用して AP の位置を推定する手法を提案している。これらの RSSI 以外に基づく手法では、AP の位置を比較的高い精度で推定可能である。その一方で、特殊な観測機器が必要であったり、観測時の行動制約が大きく、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。

しかし、これらのいずれの手法においても屋内の、少なくとも数地点においては観測地点の位置情報が得られることが前提とされている。屋内の観測位置情報を取得するため [10] ではデッドレコニングを基にした屋内端末位置推定を活用している。しかしデッドレコニングにはリアルタイムの加速度およびジャイロセンシングが必要になり、端末の電力消費が大きくなるという問題がある。また長期間にわたってセンシングを行う際には、蓄積される位置誤差の問題が問題となる。[17] では、屋内の窓際において得られる GPS による端末位置情報を利用し屋内位置情報を得ている。しかし、都市環境において窓際であっても正確な端末位置が得られるとは限らず、またユーザに観測が窓際で行われたというデータの輸入を強いることになるため、クラウドセンシングによる AP 位置データベースの構築には適していない。[18] は屋内の観測地点の位置に頼らない AP 位置推定手法を提案している。この手法では位置情報のない屋内の観測データを収集し、多次元尺度構成法 (MDS) によって屋内の相対的な 2 次元の AP 位置マップを階ごとに生成し、それを数点の位置が既知の観測点か、あるいは

位置が既知の AP を用いて、絶対座標に変換している。この基準となる屋内観測地点の座標取得方法としてユーザによる手動入力を利用している。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行う際にはユーザの負荷をなるべく削減する必要がある、手動入力は適していない。また [18] は建物出入口における GPS の情報を利用することも想定しているが、上層階に設置されている AP の位置推定の際に出入口情報を活用することは難しい。

本研究では、GPS による位置情報が利用可能な屋外観測データからの、屋内位置基準として利用可能な仮想的な AP 位置の推定と、[18] の手法を基にした屋内における観測データからの三次元多次元尺度構成法による屋内の 3 次元相対 AP 位置マップの生成を組み合わせることで、一切の屋内の観測位置情報なしに 3 次元の屋内 AP 位置を推定する。

3. 手法概要および想定環境

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 相対位置のグローバル座標系への変換から構成されている。

手法の入力となる観測データは、スマートフォンのチャンネルスキャンにより得られる周辺 AP からのビーコンの観測データである。チャンネルスキャンを行った地点をスキャン地点と呼び、スキャン地点 k において観測した AP_i からのビーコンに含まれる RSSI を $v_{(k)i}$ で表し、AP 位置に利用する。またビーコンに含まれる BSSID (MAC アドレス) により AP の識別を行う。

屋外観測データには GPS により取得した位置情報が含まれ、この位置情報の座標系をグローバル座標系と呼ぶ。屋内観測データには、スキャン地点の位置情報は含まれないが、どの建物内部で得られた観測であるかは判別可能であるとする。屋内観測データからの、観測が行われた建物の推定および観測データの屋内外の判定は、既存の GPS に基づく屋内外判定手法 [19] の活用を想定している。

屋外観測データからの仮想 AP 位置推定には、我々がすでに構築している屋外環境における 3 次元 AP 位置データベース構築手法 [20] を用いる。この手法では電波伝搬シミュレーションによる屋外の Wi-Fi 観測データの補完を目的として、その過程で、屋外における観測データを用いて、実際の屋内 AP 位置ではなく建物壁面上の仮想的な AP の位置推定を行っている。これは、屋外で電波が観測可能な AP の多くは屋内に設置されており、その電波伝搬は壁や窓の影響を強く受けるため、屋外での観測データのみから屋内の実際の AP 位置を推定することは現実的ではないためである。そのため当該手法では実際の AP 位置ではな

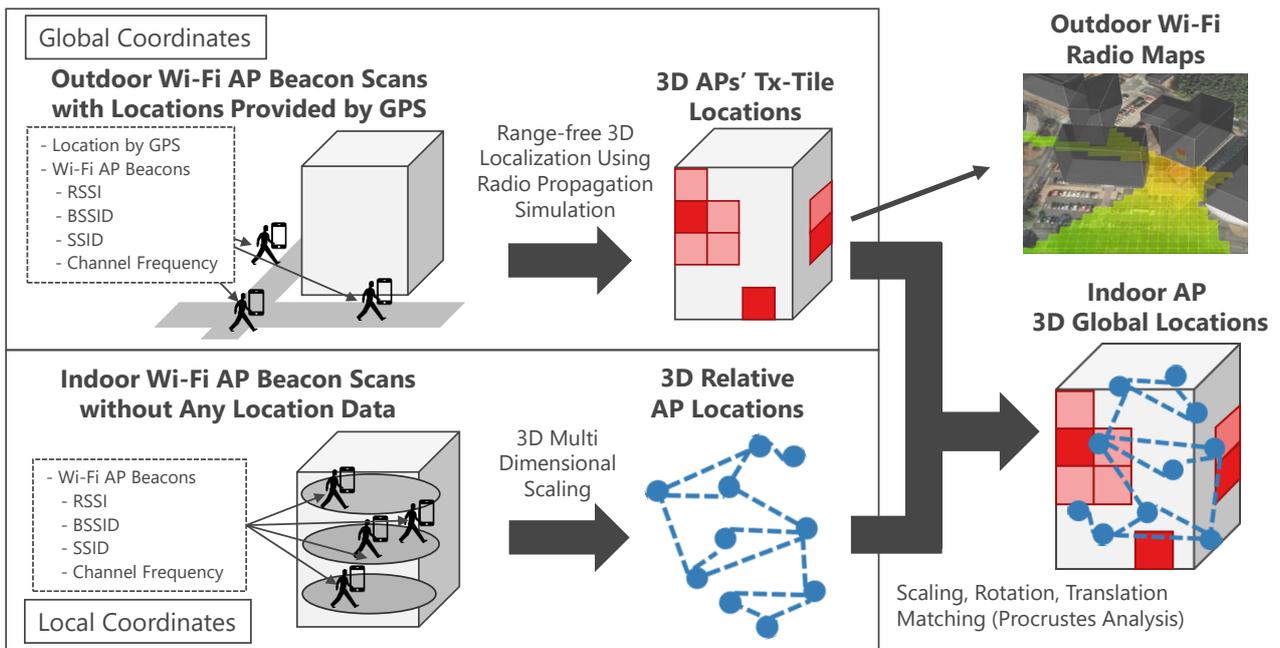


図 1 手法概要

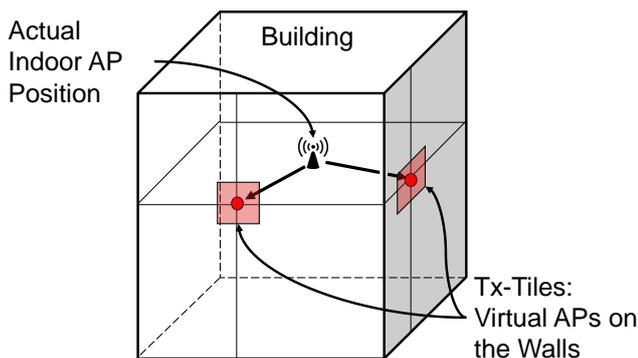


図 2 Tx-Tile

く、電波伝搬シミュレーションで屋外の Wi-Fi 観測データの補完を行うために必要十分な情報として、図 2 に示すような、建造物壁面上の仮想的な AP (Tx-tile) の位置推定を行っている。Tx-Tile の位置推定手法については 4 章で詳細に述べる。

屋内の観測データを用いた AP 間の相対 AP 位置マップの生成には多次元尺度構成 (MDS) を利用する。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ことができるものである。MDS により観測データから生成された AP 同士の相対的な AP 位置のマップを相対 AP 位置マップと呼ぶ。本研究では、MDS を活用し屋内 AP 位置の推定を実施している [18] の手法を拡張したものを利用する。[18] 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 位置マップをグローバル座標系に変化するために、位置が既知の屋内観測点が必要となる。本研究では、屋内の観測では一切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 間同士の実際の距離ではなく、相対的な距離の尺度を計算し、それに三次元の MDS (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。

屋内の相対 AP 位置マップをグローバル座標系の位置に変換するために、推定済みのグローバル座標系上の Tx-Tile を位置合わせの基準とする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を重ね合わせる手法であり、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。

予め相対 AP 位置マップ内における Tx-Tile の位置を計算しておき、グローバル座標系上の Tx-Tile と対応する相対 AP 位置マップ内の Tx-Tile 位置をプロクラステス解析することで相対 AP 位置マップの上の位置をグローバル座標系上の位置に、回転・拡大縮小・平行移動によって変換するための変換行列を得る。このとき、一般に屋内において、屋外を迂回する伝搬経路の存在や室内の壁面と天井・床の減衰の差などの影響により電波の減衰の特性は水平方向と垂直方向で異なるため、プロクラステス解析によって得られる一様な拡大縮小変換をそのまま適用することは適切ではない。そこで提案手法では、この屋内における水平方向と垂直方向の電波の減衰の差異を考慮し、先に相対 AP 位置マップ内の垂直方向軸の推定を行うことで、垂直方向の拡大縮小・平行移動と水平方向の拡大縮小・平行移動を分離する。相対 AP 位置マップの生成およびそのグローバル

座標系への変換については5章で述べる。

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

以降では、すべての屋外スキャン地点のうち、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よび、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。

ある AP_i の Tx-Tile 存在区画は複数のスキャン地点での 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 が反射等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 が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の存在領域の球群との交差数が最も多いタイルを 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っている。多くの場合、実際に AP が存在しない建物は、前述の自由空間伝搬損失に基づく距離推定により、ある地点の存在領域に含まれることはあっても、複数地点のデータを用いることで対象外とできることが多いことから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の間には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、これを用いて式 (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 (2) で得られる。なお、 $v_{(o)}$ は o に

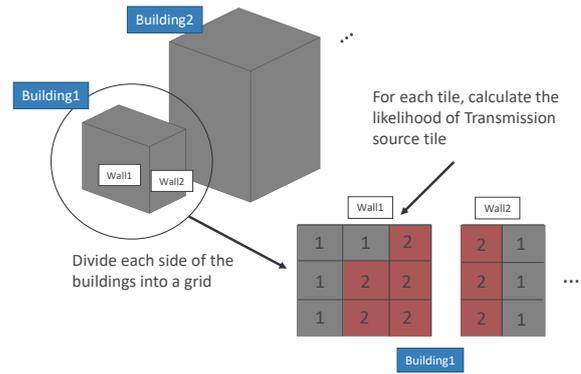


図3 建造物壁面のタイル

おける対象 AP からのビーコンの RSSI(mW)、 λ は波長である

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

また本手法では、スキャン地点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。建物壁面に面するスキャン地点において、対象 AP のビーコンが観測できなかった場合、その建物壁面のスキャン地点近くの領域に 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。

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。

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

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）の 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

表 1 Tx-Tile 位置推定の際のシミュレーションパラメータ

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

の中心に AP があるものとして、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、最小差の電波発信点位置を当該 AP の電波発信点とする。なお、本研究におけるシミュレーションにはネットワークシミュレータ Scenargie を用いている。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通りである。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、存在区画内のタイル数分の電波強度地図を取得する。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。

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

Tx-Tile 存在区画が、ある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み合わせに対して、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 の組み合わせを 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。出力強度は -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10 dBm の 7 パターンを順に選択してシミュレーションを実行し、式 (4) を最小化する電波強度地図 m_p を当該 AP の電波強度地図とし、その場合の出力強度を、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 の出力強度の組み合わせについてシミュレーションを行い、最適な組み合わせを選択する。

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任意の AP 同士が相対的にどのくらい離れているのかを表す相対距離尺度 (非類似度) を求め、その相対距離尺度に 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 AP 位置をグローバル座標系の上の対応する Tx-Tile 位置にマッピングすることによって、相対 AP 位置マップ上の屋内 AP 位置をグローバル座標系に変換する。

まず前処理として、ある建物内において、隣接する建物内に設置されている AP のビーコンを偶然で観測する場合も存在するため、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。ここ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、以下の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 間の相対距離尺度が必要である。AP _{i} と AP _{j} 間の相対距離尺度を $p_{i,j}$ で表し、相対距離尺度の行列を $\mathbf{D} = [p_{i,j}]$ とする。また屋内のスキャン地点 k と AP _{i} との相対距離尺度を $p_{(k)i}$ で表す。相対距離尺度は大きいほど、実際のグローバル座標系上でも距離が大きいことを意味する。本手法では [18] 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尺度を利用する。RSSI が $v_{(k)i}$ であるスキャン地点 k と AP _{i} との相対距離尺度 $p_{(k)i}$ を式 (5) に示す。

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

ただし、

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

AP 間の相対距離尺度 $p_{i,j}$ は、スキャン地点 k から見たときの AP 間の相対距離尺度 $p_{(k)i,j}$ を式 (6) に示す値としたとき、多くの場合は $p_{i,j} = \min_k \{p_{(k)i,j}\}$ である。ただし、 $p_{i,j} = p_{(k)i,j} = p_{(l)i,j}$ となるスキャン地点 k, l が存在した場合は、[18] に記述されているその場合の手続きに従って相対距離尺度を求める。

$$p_{(k)i,j} = \frac{|p_{(k)i} - p_{(k)j}| + 2\sqrt{p_{(k)i}^2 + p_{(k)j}^2} + p_{(k)i} + p_{(k)j}}{4} \quad (6)$$

また任意の屋内スキャン地点において、同時に観測されていない AP 間の相対距離尺度には、ノードが AP、エッジの重みが AP 間の相対距離尺度となるグラフにおける、AP 間の最短経路の累積重みをその相対距離尺度に用いる。

本研究ではさらに、以上の [18] の手法に基づく相対距離尺度行列を拡張し、相対距離尺度行列に、Tx-Tile とその Tx-Tile に対応する AP 間の相対距離尺度を付与することで、相対距離尺度行列から 3D MDS により相対 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を可能にしている。これは後述するように、この相対 AP 位置マップ上の Tx-Tile 位置をグローバル座標系上の Tx-Tile 位置へマッピングすることで、相対 AP 位置マップをグローバル座標系に変換できるようにするためである。

Tx-Tile とその Tx-Tile に対応する AP 間の相対距離尺度は次のようにして求める。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、事前に決定しておくパラメータである AP_i の出力強度を AP.TxPower を用いて Tx-Tile と AP 位置の相対距離尺度を計算する。Tx-Tile の位置でスキャンが行われたとすると、AP_i からの RSSI はおよそ $v_{(\text{TxTile})i} = \text{TxTile.TxPower}_i - \text{AP.TxPower}$ とみなすことができる。この仮想的な RSSI を式 (5) に代入することで、Tx-Tile の位置から AP_i までの相対距離尺度 $p_{(\text{TxTile}),i}$ が求まる。また Tx-Tile の位置から Tx-Tile までの相対距離尺度 $p_{(\text{TxTile}),\text{TxTile}}$ は 0 とみなせるので、式 (6) から AP_i とその Tx-Tile 間の相対距離尺度を求めることができる。

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 間の相対距離尺度を計算し、相対距離尺度行列に追加する。なお、それらの AP について、 $v_{(\text{TxTile})i}$ をあらかじめ求めておき、これらの値も手法全体で相対距離尺度計算の際に用いる MAX_RSSI と MIN_RSSI の導出に利用する。また、前述した同時に観測されていない AP 間の相対距離尺度の補完と同様に、値が定まっていない任意の AP と任意の Tx-Tile 間の相対距離尺度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 間の相対距離尺度行列 **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 l_i 、AP の Tx-Tile が存在する場合はその Tx-Tile の位置を l_{t_i} と表す。

5.2 相対 AP 位置マップのグローバル座標系への変換

次に相対 AP 位置マップ上の Tx-Tile 位置とグローバル座標系上の Tx-Tile 位置のマッピングによる、相対 AP 位置マップのグローバル座標系への変換について説明する。Tx-Tile が存在する AP の数を n とし、Tx-Tile が存在する任意の AP_i について、グローバル座標系でのその AP の

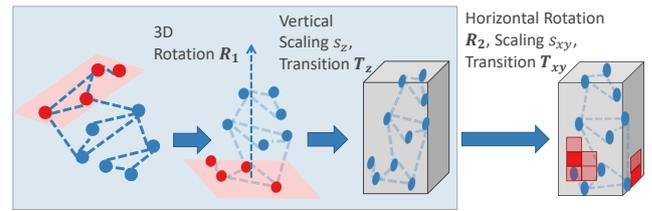


図 4 垂直方向の変換と水平方向の変換を分離

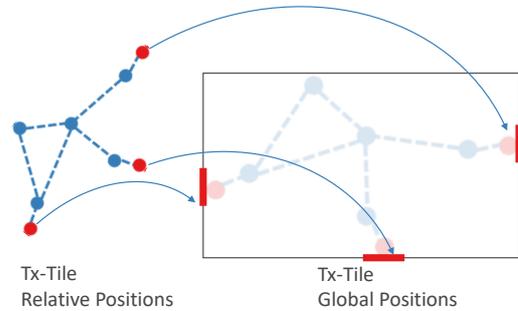


図 5 相対 AP 位置マップ内の Tx-Tile 位置とグローバル座標系の Tx-Tile 位置によるプロクラステス解析

Tx-Tile 位置を gt_i とする。なお Tx-Tile は建物壁面の領域であるが、ここではその重心の一点を Tx-Tile 位置としている。

まず単純な変換方法について述べる。グローバル座標系上の 3 次元点群 $\{gt_i\}_n^3$ と相対 AP 位置マップ上の 3 次元点群 $\{l_{t_i}\}_n^3$ 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グローバル座標系に変換するための拡大縮小量 s 、回転行列 **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、グローバル座標系上の AP_i 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。

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

しかし、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等の違いから、水平方向の相対距離尺度と垂直方向の相対距離尺度を RSSI から同様に算出して求めた相対 AP 位置マップの水平・垂直方向の拡大縮小を同一にすることは適切ではない。そこで、図 4 に示すように相対 AP 位置マップの垂直方向の拡大縮小量と水平方向の拡大縮小量の計算を分離する。そのため、まず相対 AP 位置マップ上の垂直方向軸を求める。

相対 AP 位置マップの垂直方向軸の決定は、相対 AP 位置マップ上で建物一階を表す平面を検出し、その平面が Z 平面となす角が最小となるような、3 次元の回転を見つけることで実現する。

相対 AP 位置マップ上での一階を表す平面の検出のため、まず一階に設置されているとみなせる 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 位置マップ上でのそ

これらの1階のAPの点群から平面検出を行い、検出された平面が1階の平面であるとする。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、最小二乗による平行検出ではなく、RANSACのアルゴリズムを用いる。

さらに回転後の、検出された1階の平面とZ平面がなす角を最小とするような、3次元の回転行列 \mathbf{R}_1 を求める。このとき回転後の1階のAPの重心が全APの重心よりも高い位置に来るものは、除外する。本研究においては、オイラー角で各軸1度ずつ変更し、 $360 \times 360 \times 360$ 通りの回転行列を全探索することで \mathbf{R}_1 導出した。

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。垂直方向の拡大縮小・および平行移動は建物の高さを利用し、相対AP位置マップ上で、垂直方向に一番下にあるAPをグローバル座標系での建物の1階の高さMIN_Hに、逆に垂直方向で一番上にあるAPをグローバル座標系での建物の最上階の高さMAX_Hに変換するような平行移動および拡大縮小を行う。

\mathbf{R}_1 による回転を適用後の相対AP位置 $\{\mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{l}_i\}_i$ 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行うためのベクトル \mathbf{t}_z は式(8)で求められる。

$$\mathbf{t}_z = (0, 0, \min_z - \text{MIN_H})^\top \quad (8)$$

また垂直方向の拡大縮小の値 s_z は式(9)で求められる。

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

回転変換後の相対AP位置マップ上のTx-Tile位置の点群とグローバル座標系上のTx-Tile位置の点群の、2次元のプロクラステス解析によって、座標変換のための、水平方向の拡大縮小量・回転行列、平行移動ベクトルを求める(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章で求められた AP_i の電波強度地図を式(4)により評価した電波強度地図と屋外観測データの実測RSSIとの誤差の昇順に AP_i をソートし、 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、グローバル座標系上での座標をそれぞれ $\mathbf{l}_{t(j)}$ 、 $\mathbf{g}_{t(j)}$ 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 $\{\mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{l}_{t(j)}\}_{j=1}^K$ と点群 $\{\mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{g}_{t(j)}\}_{j=1}^K$ 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} 、回転行列 \mathbf{R}_2 、平行移動ベクトル \mathbf{t}_{xy} を得る。 \mathbf{R}_2 と \mathbf{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 \mathbf{l}_i である AP_i のグローバル座標系上での位置 \mathbf{g}_i^\top は式(10)により求め

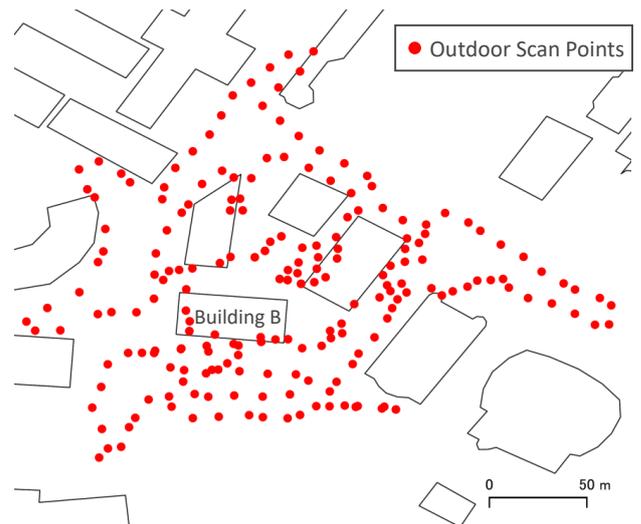


図6 屋外スキャン地点

表2 Tx-Tile位置誤差(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

られる。

$$\mathbf{g}_i^\top = s_{xy} \cdot \mathbf{R}_2 \cdot (s_z \cdot (\mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{l}_i^\top) + \mathbf{t}_z) + \mathbf{t}_{xy} \quad (10)$$

6. 性能評価

提案手法によるAPの位置推定精度を評価するため、大阪大学情報科学研究科において実験を行った。AP1からAP8までの8基のAPを建物内部に設置し、建物の周辺をスマートフォンを用いて歩行し、計215地点の屋外観測データを収集した。AP1、AP2は研究科B棟の建物1階、AP3からAP7はそれぞれB棟の2階から7階に設置した。屋外のスキャン地点を図6に示す。また同様にB棟内部を歩行し、計367地点の屋内観測データを収集した。建物内において観測された最大RSSI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、その162基のAPの観測データを相対AP位置マップの生成に利用した。設置したAP位置と推定したAP位置を図7に示す。

屋内AP位置推定の際のパラメータを $Q = 7$ 、 $K = 40$ 、 $\text{TH_1F} = -60$ 、 $\text{AP_TxPower} = 0$ としたときの、各APの推定Tx-Tile位置と実際のAP位置との誤差を表2に、提案手法による推定AP位置の誤差を表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18.0mであり、水平方向誤差が13.3m、垂直方向誤差が10.1m

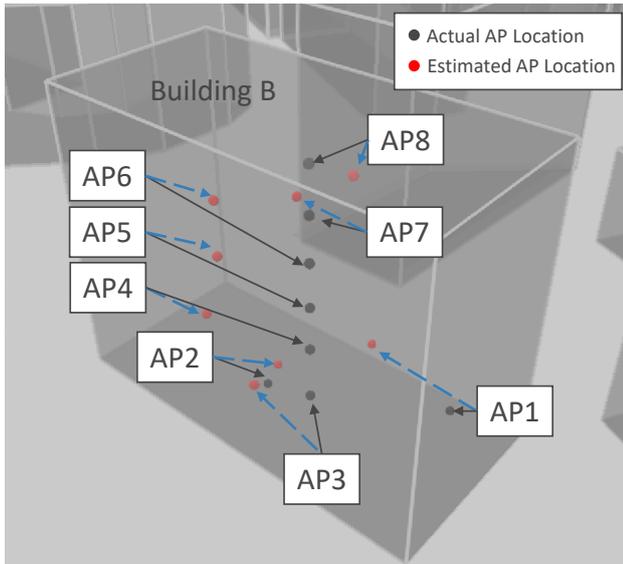


図 7 AP 設置個所および推定位置

表 3 推定 AP 位置誤差 (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

であった。屋内の観測データも併用し推定した AP の平均位置誤差は 8.4m, 水平方向誤差が 2.1m, 垂直方向誤差が 8.4m 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, Tx-Tile が推定されたものは 60 基であり, さらにそのうち推定された Tx-Tile が B 棟に存在するものは 43 基であった。

屋内の観測データを用いることで誤差が約 10m 小さくなった。特に垂直方向の誤差の改善が約 8m と著しく, これは相対 AP 位置マップをグローバル座標系に変換する際の垂直方向の拡大縮小・平行移動を建物の高さの情報の活用が有効であったためだと考えられる。

提案手法のパラメータを変化させた際の位置推定精度の変化を調べた。まず $K = 40$, $TH_{1F} = -60$, $AP_TxPower = 0$ とし。相対距離尺度の段階数 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 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。 Q を変化させても位置推定の精度に差があまり生じない点は [8] でも言及されている。

次に $Q = 7$, $TH_{1F} = -60$, $AP_TxPower = 0$ とし,

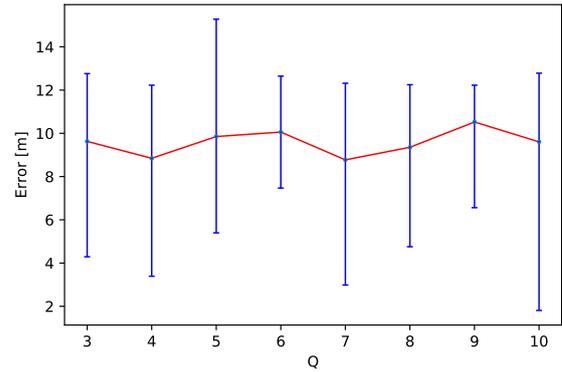


図 8 相対距離尺度の段階数 Q による位置推定精度の変化

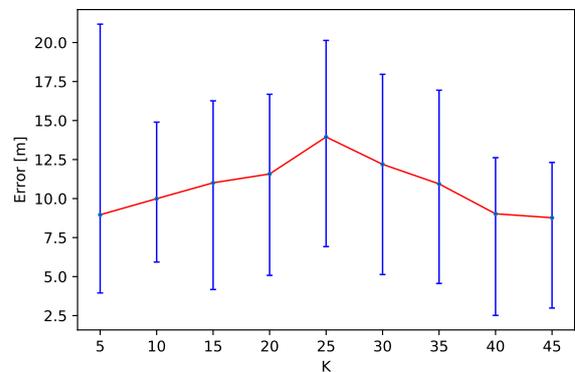


図 9 K に対する位置推定精度の変化

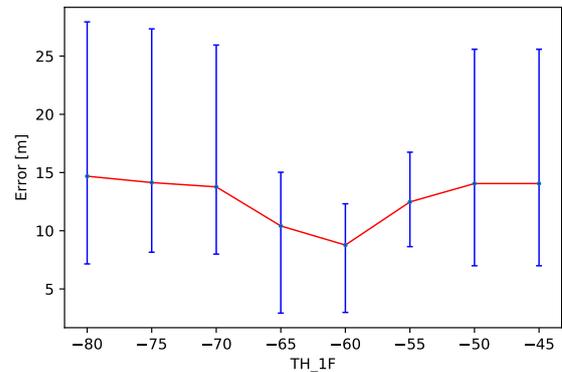


図 10 TH_{1F} に対する位置推定精度の変化

Tx-Tile をその電波強度地図の精度で並べたときの上位いくつの Tx-Tile を位置合わせに利用するかのパラメータである K を 5 から 45 まで 5 単位で変化させたときの推定誤差を図 9 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。なお今回の実験では推定された Tx-Tile のうち対象の建物に Tx-Tile が存在し, 位置合わせに利用可能なものが 43 個であったため, K

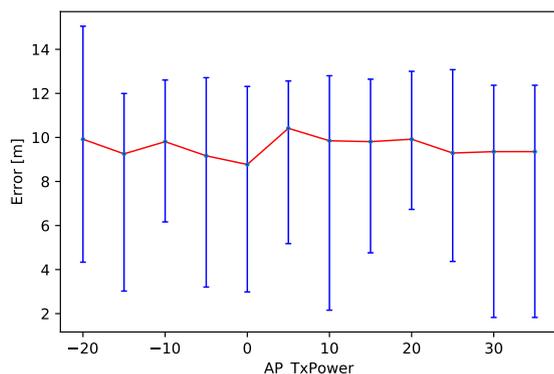


図 11 AP_TxPower に対する位置推定精度の変化

を 43 以上にしても精度に変化は生じない。これは K が小さいときには精度の高い Tx-Tile のみを用いるため位置合わせの精度が高い一方で、 K を増やすと位置推定精度の悪い Tx-Tile が混入することで位置合わせの精度が低下し、さらに Tx-Tile 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 に打ち消されるためであると考えられる。したがって、都市環境で実施する際には K は取れる値のうち十分に大きな値に設定するのがよい。

さらに $Q = 7$, $K = 40$, $AP_TxPower = 0$ とし、AP が 1 階にあるかどうかの判定に利用するパラメータ TH_{1F} を変化させたときの推定誤差の変化を図 10 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見られた。これは、TH_{1F} が小さいと 1 階以外に設置されている AP が 1 階と判定されるため精度が下がる一方で、弱に十分に大きくなると 1 階の AP として判定される AP が少なくなり、1 階平面の検出誤差が大きくなるためである。測定端末や環境によって TH_{1F} の適切な値は変化するが、都市環境においては、例えば建物 1 階にあるコンビニエンスストアに設置されているような公衆 Wi-Fi の屋外での RSSIなどを基準に、TH_{1F} を動的に設定することが可能である。

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 11 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 間距離に対して比較的小さいため、想定する AP の出力強度を変動させても、AP と Tx-Tile 間の相対的な距離尺度は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 0 dBm 周辺の値を設定することができる。

7. おわりに

本研究ではクラウドセンシングによる屋内・屋外の観測データを用いた 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消費が大きくなるという問題があるデッドレコニングの活用などが求められていた。これらの手法はユーザの作業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。そこで提案手法では、屋内の観測位置情報を一切用いず、屋外の GPS 情報から推定した仮想的な AP 位置を基準点とし、その基準点と位置情報を含まない屋内の観測データから屋内の AP 位置を推定した。

参考文献

- [1] Shin, K., Park, I., Hong, J., Har, D. and Cho, D. H.: Per-node Throughput Enhancement in Wi-Fi Densets, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 53, No. 1, pp. 118–125 (2015).
- [2] Kajita, S., Amano, T., Yamaguchi, H., Higashino, T. and Takai, M.: Wi-Fi Channel Selection Based on Urban Interference Measurement, *Proc. of the 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQutous 2016)*, pp. 143–150 (2016).
- [3] Mhatre, V. P., Papagiannaki, K. and Baccelli, F.: Interference Mitigation Through Power Control in High Density 802.11 WLANs, *Proc. of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp. 535–543 (2007).
- [4] Kauffmann, B., Baccelli, F., Chaintreau, A., Mhatre, V., Papagiannaki, K. and Diot, C.: Measurement-Based Self Organization of Interfering 802.11 Wireless Access Networks, *Proc. of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp. 1451–1459 (2007).
- [5] Localization, G.-l. L.-c. O., Bulusu, N., Heidemann, J. and Estrin, D.: GPS-less Low-Cost Outdoor Localization for Very Small Devices, *IEEE Personal Communications*, Vol. 7, No. October, pp. 28–34 (2000).
- [6] Piché, R.: Robust Estimation of A Reception Region from Location Fingerprints, *Proc. of the 1st International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS 2011)*, pp. 31–35 (2011).
- [7] Laurendeau, C. and Barbeau, M.: Centroid Localization of Uncooperative Nodes in Wireless Networks Using a Relative Span Weighting Method, *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2010 (2009).
- [8] Koo, J. and Cha, H.: Localizing WiFi Access Points Using Signal Strength, *IEEE Communications Letters*, Vol. 15, No. 2, pp. 187–189 (2011).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] Abd Rahman, M. A., Dashti, M. and Zhang, J.: Localization of Unknown Indoor Wireless Transmitter, *Proc.*

of the 3rd International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS 2013), pp. 1—6 (2013).

- [12] 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).
- [13] Han, D., Andersen, D. G., Kaminsky, M., Papagiannaki, K. and Seshan, S.: Access Point Localization Using Local Signal Strength Gradient, *Proc. of 10th International Conference on Passive and Active Network Measurement (PAM 2009)*, pp. 99–108 (2009).
- [14] Satoh, H., Ito, S. and Kawaguchi, N.: Position Estimation of Wireless Access Point Using Directional Antennas, *Proc. of 1st International Workshop on Location- and Context-Awareness (LoCA 2005)*, pp. 144–156 (2005).
- [15] 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. of 17th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. (MobiCom 2011)*, pp. 109–120 (2011).
- [16] Zheng, X., Wang, C., Chen, Y. and Yang, J.: Accurate Rogue Access Point Localization Leveraging Fine-grained Channel Information, *Proc. of 2014 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS 2014)*, pp. 211–219 (2014).
- [17] Chintalapudi, K., Padmanabha Iyer, A. and Padmanabhan, V. N.: Indoor localization without the pain, p. 173 (2010).
- [18] Koo, J. and Cha, H.: Unsupervised Locating of WiFi Access Points Using Smartphones, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 42, No. 6, pp. 1341–1353 (2012).
- [19] Katsuda, E., Uchiyama, A., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: GPS 受信状態を用いた屋内外判定法 *IPSI SIG Technical Report Mobile Computing and Pervasive System (MBL)*, Vol. 2011, No. 18, pp. 1–8 (2011).
- [20] Amano, T., Kajita, S., Yamaguchi, H., Higashino, T. and Takai, M.: 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).