

参加型ビーコンセンシングによる 3次元空間上のWi-Fiデータベース構築と可視化

天野 辰哉^{1,a)} 梶田 宗吾¹ 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹ 浦山 博史² 高井 峰生^{1,3}

概要：本研究では，スマートフォンユーザーによるWi-Fi基地局ビーコンの観測データをクラウドサーバーに集約し，それらの観測データを用いて，都市におけるWi-Fi信号の受信電波強度を3次元空間における地表面および建造物表面の各地点で推定する手法を提案する．提案手法では，Wi-Fi基地局は屋内に設置されていると仮定し，屋外の複数地点における各Wi-Fi基地局のビーコンの観測情報と周辺の建造物の地理情報から，建造物表面上における電波発信点ならびに同地点における送信電波強度を推定する．その情報をおよび建造物情報（3次元地図情報）を用いて電波伝搬シミュレーションを実施し，観測のない他地点の受信電波強度を推定することで，各地点の受信電波強度を得る．また，スマートフォン内蔵の加速度センサや近接センサを用いてスマートフォンの状態判定を行い，一定の状態取得した観測のみを用いることでスマートフォンの使用状態に起因する観測間の誤差を抑制する．スマートフォン上でビーコン観測と移動状態推定を行うアプリを開発し，それを用いて大阪大学大学院情報科学研究科の3棟周辺で観測したデータを用いて性能評価を行った結果，観測数14程度で同研究科の5台の基地局からの受信電波強度を22地点中15地点において $\pm 5dBm$ の範囲で推定できた．また，受信電波強度のシミュレーション結果を3次元地図上にマッピングし，可視化するシステムもあわせて試作している．

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目指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40万のアクセスポイント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．また，Wi-Fiは災害時の携帯通信網の代替インフラや低コストスマートシティ基盤としても重要視されている．スペインのバルセロナ市は，街路灯管理や人の通行状況，スマートパーキングなどの次世代都市インフラの情報に加え，気温や大気質・騒音レベルといった環境情報などをWi-Fiを基盤とした低

コスト通信プラットフォームを介して集約している．高度交通システム（ITS）においても路路間通信や路車間通信へのWi-Fiの活用が検討されており，路側機のセンサから取得した交通情報などをWi-Fi通信を用いて路側機間で共有し，車両ヘフィードバックするシステムも研究されている．このようにWi-Fiは重要な社会基盤の一つとなり，様々な環境での活用が期待されている．

一方で，例えば図1のように，人口集中都市の中心部ではオフィスの集中，屋外用Wi-Fi基地局の無秩序かつ過密な設置，モバイルルーターの急増，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，Wi-Fi基地局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]．一方，我々はIEEE802.11a/g/nなど既存アーキテクチャの範疇で，各基地局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基地局チャ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

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

² 住友電気工業（株）
Sumitomo Electric Industries, LTD.

³ カリフォルニア大学ロサンゼルス校
University of California, Los Angeles

a) t-amano@ist.osaka-u.ac.jp

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 Wi-Fi 基地局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基地局間干渉回避技術の多くは固定設置型の基地局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 のような移動型通信端末や、モバイルルータのような移動型基地局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。例えば移動型クライアントは基地局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」では多数の基地局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高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センシングし、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基地局を選択するためには、個々の基地局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。

これに対し、War Driving やクラウドソーシングにより Wi-Fi の観測データを収集し Wi-Fi 通信状況を地点ごとにデータベース化し、Wi-Fi 接続品質予測に活用する試みもなされている [3]。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従来よりも容易になり、Wi-Fi データベースとして今後の利活用が期待される。その一方で、協力者の数や行動パターンによっては十分な観測密度が得られない地点も多く、都市広域を面的にカバーする情報を観測データのみで頼ることは現実的ではない。観測点間の補間などの技術も提案されているが、特に都市部においては建造物による複雑な地形により、観測地点の近隣地点でも電波状況が大きく異なることも多い、したがって、十分でない観測数から都市広域の電波状況を正しく推定する技術は未だ十分でないといえる。

本研究では、スマートフォンユーザーによる Wi-Fi 基地局ビーコンの観測データをクラウドサーバーに集約し、都市広域の Wi-Fi 信号の受信電波強度を 3 次元空間における地表面および建造物表面の各地点で推定する手法を提案する。提案手法では、多くの Wi-Fi 基地局は屋内あるいは建造物壁面等に設置されていると仮定し、屋外の複数地点における各 Wi-Fi 基地局のビーコンの観測情報から、その基地局の存在空間や非存在空間を球体で表現し、周辺の建造物の地理情報と組み合わせることで、基地局からの電波が到来したと推定される建造物表面上の電波発信点ならびに同地点における送信電波強度を推定する。その情報をおよび建造物情報（3 次元地図情報）を用いて電波伝搬シミュ

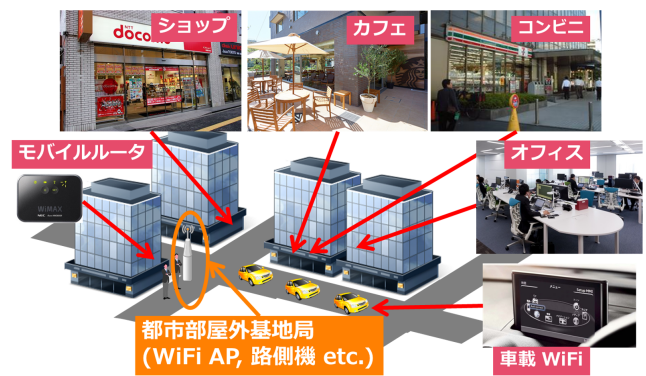


図 1 都市部における Wi-Fi

レーションを実施し、観測のない他地点の受信電波強度を推定することで、各地点の受信電波強度を得る。なお、推定後に観測が新たに追加された場合は、新しい観測との整合性が取れるよう、推定地点も更新するとともに、推定地点における送信強度もあわせて推定する。また、移動中や静止中など、様々な状況におけるスマートフォン観測から可能な限り安定した観測を得るため、スマートフォン内蔵の加速度センサや近接センサを用いてスマートフォンの状態判定を行い、一定の状態取得した観測のみを用いることで観測間の誤差を抑制する。

スマートフォン上でビーコン観測と移動状態推定を行うアプリを開発し、それを用いて大阪大学大学院情報科学研究科の 3 棟周辺で観測を行った。提案手法に基づき電波発信点を推定し、ネットワークシミュレータ Scenargie [4] を用いて未観測地点での受信電波強度をシミュレーションした結果、観測数 14 程度で同研究科の 5 の基地局からの受信電波強度を 22 地点中 15 地点において $\pm 5dBm$ の範囲で推定できた。また、受信電波強度のシミュレーション結果を 3 次元地図上にマッピングし、可視化するシステムもあわせて試作している。

2. 関連研究

既存の基地局干渉回避技術の多くは固定設置型の基地局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基地局数向上に寄与する。しかし、スマートフォンや車載機 Wi-Fi のような移動型通信端末や、モバイルルータのような移動型基地局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。例えば遠方の基地局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基地局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。Wi-Fi 基地局、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」をなんらかの形で提供する必要がある。

通信環境コンテキストとして利用できる情報の一つとし

て基地局の位置情報が挙げられる．典型的な基地局の位置推定手法として観測地点における電波の到来方向から基地局の位置を推定する方法がある．電波の到来方向を取得する方法として，指向性アンテナを用いて直接電波を取得する手法 [5] などがあるが，取得のための専門機器が必要となる．また観測者の移動による受信強度の変化から電波の到来方向を推定し基地局の位置を推定する手法 [6, 7] や，スマートフォンを持った観測者が観測地点で回転し到来方向を推定する手法 [8] があるが，これらは観測者が決まった動作を行う制約が存在する．また受信強度 RSSI だけでなく電波の位相を含む情報である CSI (Channel State Information) を利用して推定する手法 [9] があるが，汎用のスマートフォンで CSI を取得するのは難しい．

他に，Wi-Fi による端末位置推定情報を通信環境コンテキストに利用することも考えられる．既存研究で多く用いられる測位技術の一つとして，Wi-Fi 電波情報のフィンガープリントに基づく測位手法 [10] がある．この手法は既設 Wi-Fi を活用できる利点から，活発に研究開発が進められている技術である．この技術では，建物内の各地点において複数の Wi-Fi 基地局からの RSS(フィンガープリント) を測定し，あらかじめ環境内の電波強度マップを作成しておく．モバイル端末で観測された RSS と電波強度マップとのマッチングを行うことで，端末の現在位置を数 m ~ 数十 m の精度で推定することを可能にしている．例えば，PlaceEngine [11] は，ユーザの行動情報を利用し，Wi-Fi 基地局を基準局とした測位プロセスを効率的に行う推定手法を提案しており，また現在商用展開がなされている．また，少ない基地局数のもとではモバイル端末同士が基準位置情報を補完しあう無線アドホック通信に基づく協調位置推定手法も知られている [12]．文献 [13] は，モバイル端末間で Wi-Fi および Bluetooth による無線通信を行い，受信電波強度に基づき端末間の距離を推定することで，端末同士の相対的な位置関係を導出する．

本研究では不特定多数の歩行者が持つスマートフォンから集約される情報ならびにインターネット上のコンテキストを最大限に活用し，通信環境コンテキストとして，都市レベルでの Wi-Fi データベースの構築を目的とする．このデータベースでは Wi-Fi 基地局群の位置情報を主に取り扱い，集約されたビーコン情報から推定された基地局の電波発信点と推定領域情報に基づくシミュレーションによって補完された観測データを 3 次元可視化する．

3. Wi-Fi 観測データ収集システムの概要

本研究において想定するシステムを図 2 に示す．このシステムは，クラウドソーシングや参加型センシングを活用し，協力歩行者のスマートフォンから得られた都市部の Wi-Fi 観測データを集約する．観測では主に周辺のアクセスポイントからのビーコンの受信強度，基地局の MAC ア

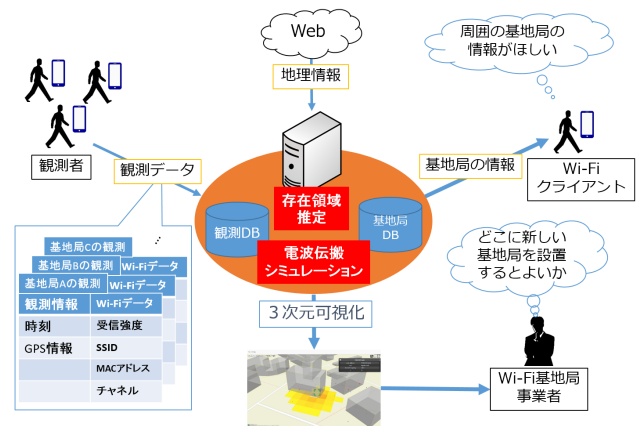


図 2 提案する Wi-Fi 観測データ集約システム

ドレスおよび SSID，使用するチャンネル周波数，さらに GPS から得られる観測地点の位置情報を収集する．Android 端末の場合，OS が内部で管理する観測可能な基地局の受信強度，MAC アドレス，SSID，チャンネル周波数の情報は Wi-Fi Manager API を利用することで取得可能であることから，提案手法では Android 端末による観測を前提とする．観測において，同地点で異なる受信強度が観測されている場合は，その平均値をその地点での受信強度とする．収集した観測データから，基地局の存在空間を推定し，周辺の建造物の地理情報と組み合わせることで，基地局からの電波が到来したと推定される建造物表面上の電波発信点と同地点における送信電力強度を推定する．その情報を用い，建造物情報 (3 次元地図情報) を用いて電波伝搬シミュレーションを実施し，観測のない他地点の受信電波強度を推定することで，各地点の受信電波強度を得る．なお，推定した受信電波強度は 3 次元地図上に可視化することが可能である．

4. スマートフォンによる Wi-Fi ビーコン観測手法

前述のようなデータを集約することにより，専門機器による高コストなセンシングなしに都市広域の Wi-Fi 環境を把握可能になる．一方で，歩行者が汎用のスマートフォンを用いて観測を行うため，端末の持ち方が観測結果に大きな影響を与える．これを確かめるため周囲に人や車などの動く物体がほとんどいない状況で，ほぼ同時刻に同じ観測地点においてスマートフォンを用いて 1 秒間隔で 10 秒間，ある基地局からの受信強度を様々な持ち方で測定した．10 秒間の平均の受信強度を図 3 に示す．持ち方によりアクセスポイントからの受信強度が変化することがわかり，特に手に持った場合とズボンのポケットに入れた場合で受信強度に 17dB の差が生じていることがみてとれる．このように同じ地点での観測であっても，様々な持ち方による観測が混在するために，電波の状況が正確に把握できなくなる

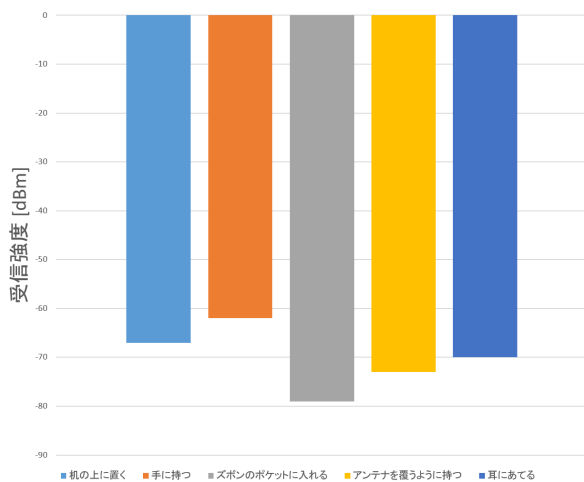


図 3 スマートフォンの持ち方による観測結果の差

可能性がある。

そこで本研究ではスマートフォンの内蔵センサを用いてスマートフォンの状態を推定し、特定の状態で観測データのみを有効なデータとして扱うことにより、持ち方による差を抑える。加速度センサ・近接センサ・照度センサの値を 10ms ごとに取得し、その i 番目の観測を (a_i, p_i, l_i, w_i) とする。 a_i, p_i, l_i はそれぞれ i 番目の観測により得られた 3 軸の加速度のノルム、近接しているかそうでないか (1 または 0) を表す 2 値、ならびに照度 (lux) である。 w_i は収集対象の Wi-Fi 観測データであり、周辺の基地局からの受信強度 (dBm) を並べたベクトルである。これらの観測を 50 回の観測 (500ms) ごとにタイムスロットで分割する。 x 番目 ($x \geq 1$) のタイムスロットに属する観測の集合を TS_x とすると、 $TS_x = \{i | 50(x-1) \leq i < 50x\}$ となる。あるタイムスロットにおいてスマートフォンが静止していたかどうかの判定は加速度ノルムの標準偏差を用いて判定し、カバンやポケットに入っていたのかどうかは照度センサおよび近接センサにより判定する。具体的にはあるタイムスロット x が条件 (1) を満たすとき、そのタイムスロットを有効なタイムスロットとする。ここで $SD(X)$ は集合 X の値の標準偏差を示す。

$$SD(\{a_i | i \in TS_x\}) < 1.0 \wedge \forall i \in TS_x (p_i = 0 \wedge l_i > 0) \quad (1)$$

ある TS_x が有効なタイムスロットであるとき、 $\{w_i | i \in TS_x\}$ を有効な Wi-Fi の観測データとして記録する。このような方法によりスマートフォンの端末の使用状態判定を行い、適切な状態で Wi-Fi 観測データのみを有効とすることで持ち方による受信強度の差を抑制する。

5. Wi-Fi ビーコン観測からの受信電波地図構築手法

ユーザ協力型センシングにより Wi-Fi 観測データを収集する場合、観測地点の偏りが生じる。例えば、人が多く通

行する歩道では十分な量の観測データが得られるが、細街路などでのデータは得られにくい。本研究では建物表面における電波の発信点を 3 次元空間上で推定し、その情報をもとに電波伝搬シミュレーションを行い、観測のない各地点においても電波受信強度を推定する。以下ではこれらの手順について述べる。

5.1 基地局に対応する電波発信点の推定

提案手法では観測データを元に各基地局の存在空間と非存在空間を球で表し、それらの球の交差空間と建物の表面情報 (3 次元建物地図) に基づいてその基地局の建物表面における発信点を求める。

基地局の存在空間は、観測地点における受信強度から自由空間伝搬損失に基づき基地局と観測地点間の最大距離を算出し、その距離を半径とした観測地点が中心となる球として表現する。基地局の非存在領域の球は、その基地局からの信号が観測されていない観測地点を中心に自由空間において -70dBm の受信強度を観測できる距離を半径とした球とする。これはある基地局からの信号が観測されていないのであれば -70dBm の受信強度および自由空間伝搬損失を仮定した場合に電波到達可能な距離内には当該基地局は存在しないと経験的に考えられることによる。

基地局に対する電波発信点の存在領域推定の問題設定は以下の通りである。今、得られたすべての観測の集合を $\{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_N\}$ とする。観測 T_i は地点 i でのビーコン観測に基づく無線 LAN 観測によって得られた基地局の受信電波強度と MAC アドレスの組を要素とする集合である。 T_i の各要素 $t_{i,j}$ を $t_{i,j} = (RSS_{i,j}, ap_j)$ とし、 $RSS_{i,j}$ は地点 i において基地局 j から受信した信号の受信電力、 ap_j は基地局 j の MAC アドレスを表すとする。集合 AP_s を一度でも観測された基地局の集合とする。地点 i の緯度、経度を (x_i, y_i) で表し、簡単のため観測地点の高さはすべて 0 であるとし、対象領域に存在する建物を $k (k = 1, 2, \dots, M)$ で表す。建物 k は底面の高さが 0 の多角柱であるとし、その k の側面の集合を $W_k = \{W_{1,k}, W_{2,k}, \dots, W_{M,k}\}$ で表す。側面 $W_{m,k}$ を $H[m]$ 間隔で格子状に分割した各区画を $W_{m,k}(u, v)$ (左下区画を (1, 1) としたとき、当該区画が (u, v) にあるとき) と図 4 のように表し、全区画の集合 As を $As = \cup_k \cup_m \cup_v \cup_u \{W_{m,k}(u, v)\}$ とする。提案する手法は集合 As の要素である基地局から As の部分集合への関数を求める手法である。以降の節ではある基地局 j に対応する発信点の存在領域推定アルゴリズムの詳細を述べる。

5.1.1 基地局の存在空間

基地局 j の存在領域の球は観測地点における信号の受信強度から自由空間伝搬損失に基づいて基地局 j と観測地点間の距離を算出し観測地点を中心とする球で表す。まず基地局 j の信号を観測した地点の集合 O_j を定める (式 (2))。

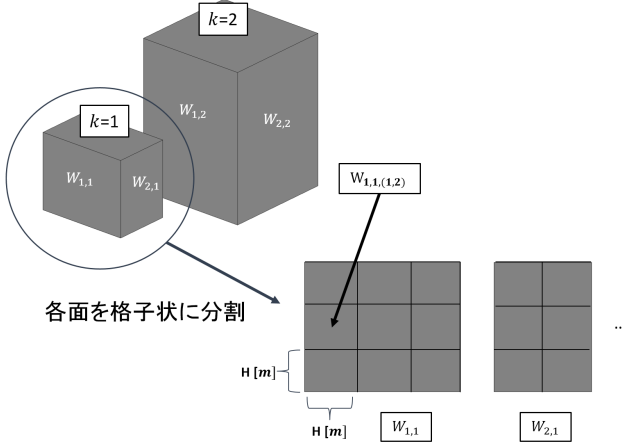


図 4 建物の領域の定義

$$O_j = \{i | t_{i,j} \in T_i (1 \leq i \leq N)\} \quad (2)$$

次に集合 O_j に含まれる地点 i から受信強度に基づいて存在領域を表す球 $B_{i,j}$ を求める．球 $B_{i,j}$ の半径は観測 $t_{i,j}$ での基地局 j からの信号の受信強度 $RSS_{i,j}$ から自由空間伝搬損失モデルに基づいて計算した基地局と観測端末間の距離であり，中心は観測地点の緯度，経度 (x_i, y_i) である．ここでは自由空間伝搬損失モデルを用いているが，自由空間における基地局からの電波の端末での受信電力 P_r は式 (3) で求めることができる．ここで L は自由空間伝搬損失， P_t は基地局の送信電力 $[W]$ ， G_t は送信アンテナの利得， G_r は受信アンテナの利得をそれぞれ表す．

$$P_r[W] = \frac{P_t G_t G_r}{L} \quad (3)$$

自由空間伝搬損失 L は，式 (4) で定義されている．なお， d は基地局と観測端末間の距離， λ は電波の波長をそれぞれ表す．

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (4)$$

さらに実際の基地局が存在する地点におけるおおよその受信電力(距離 0 での受信電力)を $P_0[W]$ とすれば $P_0 = P_t G_t G_r$ として計算でき，受信電力 P_r と P_0 から距離 d は式 (5) となり，基地局と観測端末間に障害物がない自由空間を仮定した時の距離を求めることができる．なお，本手法では距離 0 での受信強度はおおよそ推定可能であると仮定し，実装の際には -30dBm であるとした．

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_0}{P_r}} \quad (5)$$

実環境では建物の壁からの反射波などの影響により，この場合の伝搬損失は自由空間伝搬損失よりも大きくなる可能性が高い．このため，自由空間伝搬損失を元に求めた球 $B_{i,j}$ の半径は基地局 j の存在可能範囲の上限を表す．基地局 j の存在領域の集合を $B_j = \{B_{i,j} | t_{i,j} \in O_j\}$ とする．

5.1.2 基地局の非存在空間

基地局 j から送出された信号を観測できていない地点の情報を利用した基地局 j の非存在領域について説明する．まず基地局 j から送出された信号を観測していない地点の集合 \bar{O}_j を定める．

$$\bar{O}_j = \{i | t_{i,j} \notin T_i (1 \leq i \leq N)\} \quad (6)$$

そして集合 \bar{O}_j の要素である地点 i の緯度および経度 (x_i, y_i) を中心とした非存在領域を表す球 $\bar{B}_{i,j}$ を求める．このとき半径は自由空間において -70dBm の受信強度を観測できる距離であるとする．これは基地局 j からの信号が観測されていないのであれば，経験的に -70dBm の受信強度を仮定し自由空間伝搬損失に基づいて基地局と観測地点間の距離よりも遠くにあると考えられるためである．このようにして求めたすべての球 $\bar{B}_{i,j}$ の集合を $\bar{B}_j = \{\bar{B}_{i,j} | t_{i,j} \in \bar{O}_j\}$ とする．

5.1.3 建物側面における発信点推定

すべての建物の側面集合を $W = \cup_m \cup_k \{W_{m,k}\}$ とし，ある球体 b と平面 w との交差平面上において， b に含まれる領域を $S(b, w)$ とする．集合 S_j を，基地局 j に関する存在領域の集合 B_j に含まれる各球体 $B_{i,j}$ と交わる建物側面上の区画の集合とし，以下で定義する．

$$S_j = \{W_{m,k}(u, v) | B_i \in B_j, W_{m,k} \in W, W_{m,k}(u, v) \in S(B_i, W_{m,k})\} \quad (7)$$

S_j は，基地局 j の存在領域集合 B_j から推定される，基地局 j の発信点の区画集合である．非存在領域についても対応する区画集合を \bar{S}_j として以下で求めることができる．

$$\bar{S}_j = \{W_{m,k}(u, v) | \bar{B}_i \in \bar{B}_j, W_{m,k} \in W, W_{m,k}(u, v) \in S(\bar{B}_i, W_{m,k})\} \quad (8)$$

以上に基づき，区画 $W_{m,k}(u, v)$ ごとに基地局 j の存在可能性を表す尤度 $\mathcal{L}(W_{m,k}(u, v))$ を求める (式 (10))．

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(W_{m,k}(u, v)) &= \sum_{s \in S_j} f(W_{m,k}(u, v), s) - \sum_{s \in \bar{S}_j} f(W_{m,k}(u, v), s) \end{aligned} \quad (9)$$

ただし，

$$f(a, s) = \begin{cases} 1 & (a \text{ と } s \text{ が共通領域をもつ場合}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

$\mathcal{L}(W_{m,k}(u, v))$ の初期値は 0 とし， $W_{m,k}(u, v)$ が基地局 j の存在領域である断面 S_j の要素と共通部分を持つなら，その断面の数だけ $\mathcal{L}(W_{m,k}(u, v))$ の値を 1 増やす．非存在領域である断面についてはその断面の数だけ $\mathcal{L}(W_{m,k}(u, v))$ の値を 1 減らす．このようにして尤度を計算し，最も大きい $\mathcal{L}(W_{m,k}(u, v))$ を持つ区画を基地局 j の発信点存在区画とする．

5.2 シミュレーションによる観測データの補間

推定により得られた基地局の発信点存在区画と建造物情報、さらに実際の観測データを利用して電波伝搬シミュレーションを行い、基地局の存在領域周辺での Wi-Fi 観測データを取得する。シミュレーションにはネットワークシミュレータ Scenargie の FUPM (Fast Urban Propagation Module) を利用する。

基地局 j の位置と出力強度、建物データを入力として与えることにより、周辺環境における基地局 j からの受信強度が得られる。ただしシミュレータの仕様上、建物内部にシミュレーション上の基地局を設置することができないため、建物の壁面に存在する仮想的な基地局をシミュレーション上の基地局として設定する。基地局 j の発信点存在区画が建物の複数の側面にわたる場合、各側面における発信点存在区画の重心にシミュレーション上での電波発信点を設置する。

基地局 j の電波発信点の集合 P_j を $P_j = \{p_{j,1}, p_{j,2}, \dots, p_{j,l}, \dots\}$ と表す。電波発信点 $p_{j,l}$ の出力強度を $TX(p_{j,l})$ と表し、その集合を TX_j とする。各電波発信点の出力強度は経験的に -10, -15, -20dBm の中から選択し、各発信点の出力強度の組み合わせからシミュレーションと実観測データとの誤差が最も小さくなるパターンを選択する。つまり式 (10) を最小にする各 $TX(p_{j,l})$ を $p_{j,l}$ の出力強度とする。

$$\sum_{i=1}^N \{RSS_{i,j} - Sim(P_j, TX_j, i)\}^2 \quad (10)$$

$Sim(P_j, TX_j, i)$ は基地局 j の電波発信点の集合 P_j とその出力強度の集合 TX_j を設定してシミュレーションを行ったときの地点 i における電波受信強度を示す。

以上のように電波発信点 $p_{j,l}$ の位置とその出力電波強度 TX_j を決定し、シミュレーション結果を取得することで観測のない地点の受信電波強度を推定する。

6. 実験と評価

観測データを蓄積するデータベースを図 5 のように設計し、観測データおよび観測データから推定した基地局の存在領域と周辺地点での基地局からの受信強度を可視化するシステムを実装した (図 6)。さらに実環境において自開発のスマートフォンアプリにより Wi-Fi データを観測し、データベースへの集約した。集約されたデータを用いて基地局の存在領域及び周辺の地点における受信強度を推定し本研究の手法の評価を行った。

6.1 実験環境

大阪大学大学院情報科学研究科の 3 つの研究棟 (A 棟, B 棟, C 棟) の内部の窓際に AP1 から AP5 の 5 基の基地局を設置した。A 棟は 6 階建て高さ 25m, B 棟, C 棟はと

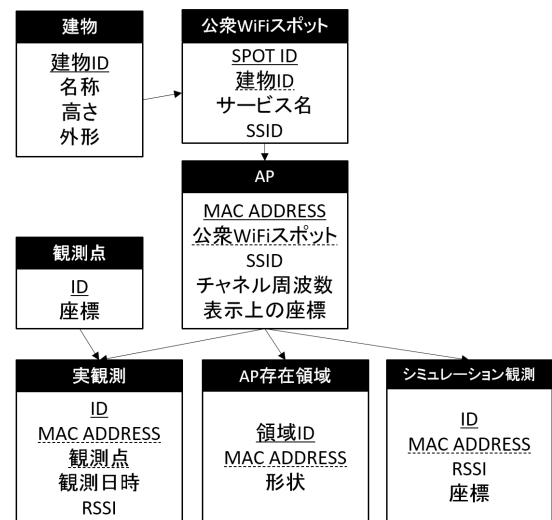


図 5 データベースの設計

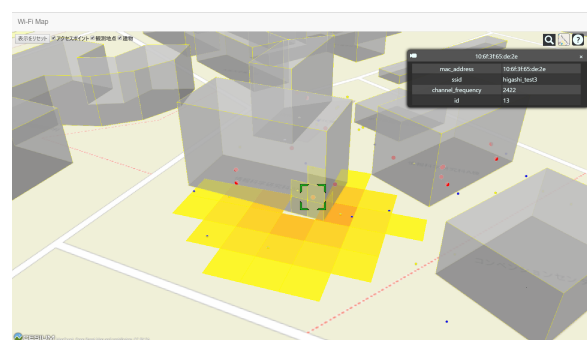


図 6 Wi-Fi データベースの3次元可視化



図 7 測定用のログアプリケーション

もに 7 階建て高さ 30m である。AP1 と AP2 は C 棟の 3 階に、AP3 は B 棟の 1 階に、AP4 は B 棟の 4 階に、AP5 は A 棟の 6 階にそれぞれ設置した。測定用ログアプリケーションを Android アプリケーションとして実装し Nexus 5 を利用して観測を行った。図 8 に示す 27 地点で観測を行い、青い点で表した 14 地点での観測データを基地局の存在領域推定及び周辺の受信強度の推定に用い、残りの黄色い点で表した 13 地点での観測データはシミュレーションによる観測との差の評価に用いた。

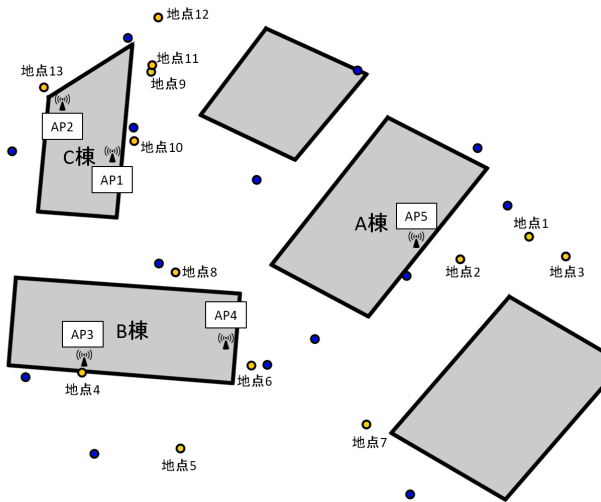


図 8 基地局の設置箇所と観測地点

表 1 推定した各電波発信点における出力強度

電波発信点	送信電波強度 (dBm)
AP1-1	-10
AP2-1	-10
AP2-2	-15
AP2-3	-20
AP3-1	-15
AP3-2	-20
AP4-1	-20
AP4-2	-15
AP5-1	-15

6.2 評価結果

観測データから推定した AP1 から AP5 までの各基地局の存在領域およびそれらのシミュレーション上での基地局の位置を図 9 に示す。建物の壁面上の黄色い領域が推定された基地局の存在領域であり、赤い点が各面における電波発信点である。例えば AP2 については存在領域が図 9(b), 9(c) に示すように C 棟の 3 つの壁面にわたっているため、AP2-1 から AP2-3 までの 3 つの仮想的な基地局がシミュレーション上で AP2 として設定する基地局の位置となる。AP1 以外の基地局については実際の基地局の設置箇所が推定した存在領域に含まれていた。

存在領域の推定により得られた、電波発信点の位置を用いてシミュレーションを行い、各基地局の出力強度および周辺での受信強度を推定した。さらに基地局周辺の地点の受信強度についてシミュレーションの値と実測の値を比較するため、基地局ごとに地点 1 から 13 までの地点での実際の受信強度とシミュレーションでの受信強度を比較した。各基地局の送信電波強度を表 1 に、実際の観測を地点での受信強度の比較を図 10 に示す。22 パターンの観測データのうち 15 のパターンで実測とシミュレーションでの結果が誤差 5dBm 以内に収まっていることがわかる。

7. まとめと今後の課題

本研究ではクラウドソーシングなどの枠組みを利用し、不特定多数の協力歩行者のスマートフォンから無線 LAN の観測データを収集する際に発生する観測時の誤差の問題、さらに観測データの量が十分でない問題に取り組んでいる。スマートフォンによる観測では観測者が端末をどのように保持するのにより結果が大きく変動するため、スマートフォン内蔵センサを利用してスマートフォンの状態判定を行い、特定の状態でのみ観測を行うようにした。また観測データ数の問題を解決するため、観測データをもとにシミュレーションを行い、実際に観測が行われた地点以外の地点における観測データの推定を行った。シミュレーションを行うために観測データを元に基地局の存在領域を推定している。以上の手法をもとに観測データを収集するシステムを実装し、実環境において実験を行っている。また、受信電波強度のシミュレーション結果を 3 次元地図上にマッピングし、可視化するシステムもあわせて試作した。今後の課題として存在領域推定の精度向上がある。これに対しては、Web 上から取得可能な公衆 Wi-Fi スポットの位置情報や屋内からの観測を利用することで推定の精度を向上させることが可能であると考えられる。

参考文献

- [1] Shin, K., Park, I., Hong, J., Har, D. and Cho, D.-H.: Per-node throughput enhancement in Wi-Fi densenets, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 53, No. 1, pp. 118–125 (2015).
- [2] Kajita, S., Yamaguchi, H., Higashino, T., Urayama, H., Yamada, M. and Takai, M.: Throughput and Delay Estimator for 2.4GHz WiFi APs: A Machine Learning-Based Approach, *Proc. 8th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC 2015)*, pp. 223–226 (2015).
- [3] Kim, M., Fielding, J. J. and Kotz, D.: Risks of Using AP Locations Discovered Through War Driving, *Pervasive Computing*, Vol. 3968, Springer, pp. 67–82 (2006).
- [4] Space-Time Engineering, LLC: Scenargie (Online). <http://www.spacetime-eng.com/> (参照: 2016/2/16).
- [5] Satoh, H., Ito, S. and Kawaguchi, N.: Position Estimation of Wireless Access Point Using Directional Antennas, *Location- and Context-Awareness*, Vol. 3479, Springer, pp. 144–156 (2005).
- [6] Han, D., Andersen, D. G., Kaminsky, M., Papagiannaki, K. and Seshan, S.: Access Point Localization Using Local Signal Strength Gradient, *Passive and Active Network Measurement*, Vol. 5448, Springer, pp. 99–108 (2009).
- [7] Zhao, F., Luo, H., Geng, H. and Sun, Q.: An RSSI gradient-based AP localization algorithm, *IEEE China Communications*, Vol. 11, No. 2, pp. 100–108 (2014).
- [8] Zhang, Z., Zhou, X., Zhang, W., Zhang, Y., Wang, G., Zhao, B. Y. and Zheng, H.: I Am the Antenna: Accurate Outdoor AP Location Using Smartphones, *Proc. ACM 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2011)*, pp. 109–120 (2011).

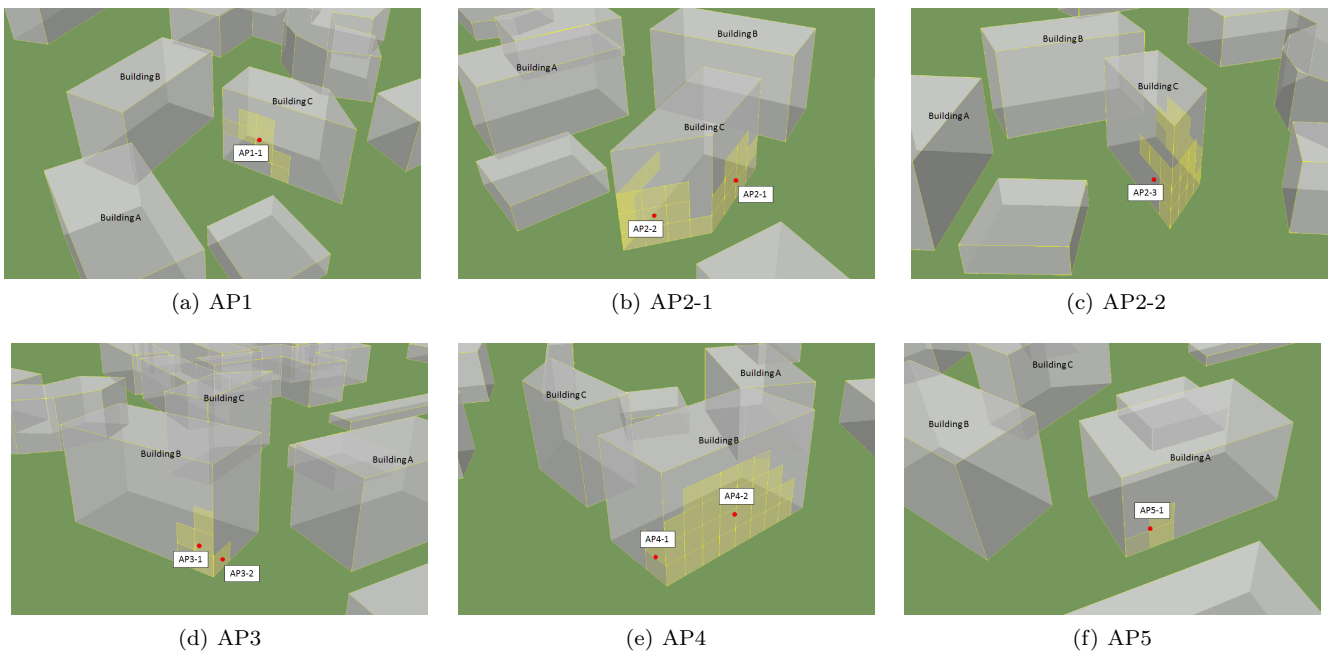


図 9 推定された存在領域とシミュレーション上の基地局の位置

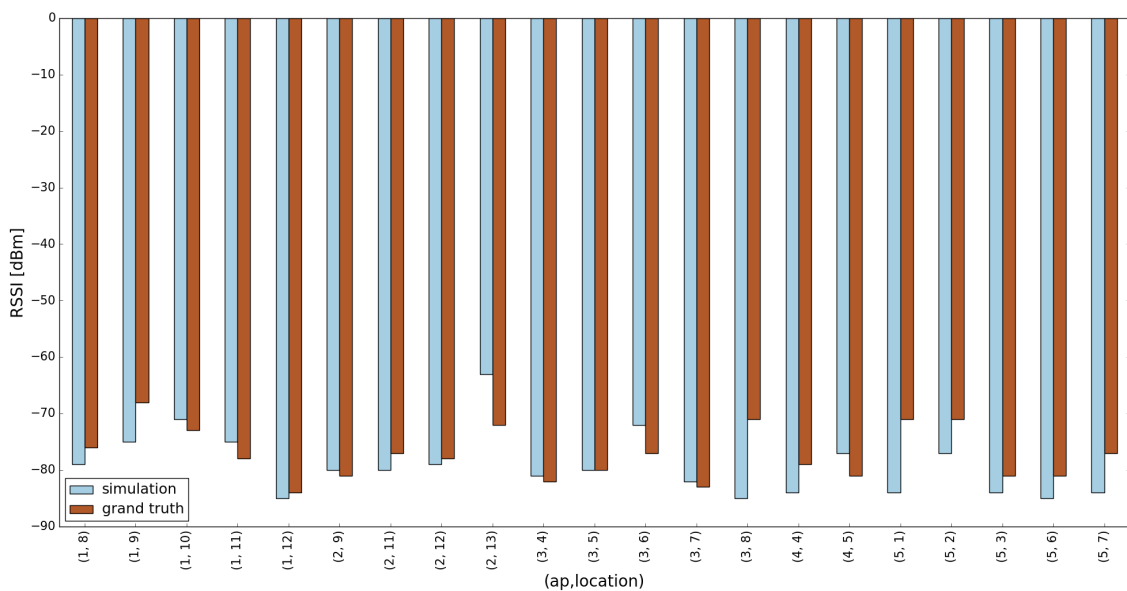


図 10 実測値とシミュレーションによる値の比較

- [9] Zheng, X., Wang, C., Chen, Y. and Yang, J.: Accurate Rogue Access Point Localization Leveraging Fine-grained Channel Information, *Proc. IEEE 2014 Conference on Communications and Network Security (CNS 2014)*, pp. 211–219 (2014).
- [10] Bahl, P. and Padmanabhan, V. N.: RADAR: An In-building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. IEEE 19th International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2010)*, Vol. 2, pp. 775–784 (2000).
- [11] 暦本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, 味八木崇: PlaceEngine: 実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤, *インターネットコンファレンス 2006*, pp. 95–104 (2006).
- [12] Higuchi, T., Fujii, S., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: An Efficient Localization Algorithm Focusing on Stop-and-go Behavior of Mobile Nodes, *Proc. IEEE 9th International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2011)*, pp. 205–212 (2011).
- [13] Banerjee, N., Agarwal, S., Bahl, P., Chandra, R., Wolman, A. and Corner, M.: Virtual Compass: Relative Positioning to Sense Mobile Social Interactions, *Proc. 8th International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2010)*, pp. 1–21 (2010).