

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

天野 辰哉¹ 梶田 宗吾¹ 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹ 高井 峰生^{1,2}

受付日 2017年5月9日, 採録日 2017年11月7日

概要: 本論文では, クラウドソーシングによりスマートフォンユーザから収集した Wi-Fi アクセスポイント (AP) からのビーコン観測データと電波伝搬シミュレーションを併用し, 3次元都市環境における Wi-Fi 電波強度地図を効率的に生成する手法を提案する. 提案手法では, 建造物内に設置される Wi-Fi AP の仮想的な位置を電波発信点として建造物表面に仮定し, この位置を屋外を歩行するスマートフォンユーザから収集したビーコン情報をもとに推定する. 推定した電波発信点候補を用いて網羅的に電波伝搬シミュレーションを実施し, スマートフォンユーザの観測データに最も一致する電波発信点位置を取得することで電波強度地図を構築する. 提案手法に基づく Wi-Fi 電波強度地図サーバならびにスマートフォンアプリを実装し, 大阪大学吹田キャンパス内の電波強度地図を構築し, AP 間ハンドオーバーを行うシナリオを用いて電波発信点の位置推定精度および電波強度地図の精度を評価した. その結果, 平均推定位置誤差は 14.65 m であり, ランダムに抽出した地点における観測において, 実測 RSS と推定 RSS の誤差が, 65%の地点で ± 5 dBm に収まった. また, 大阪市内およびサンフランシスコにおいて被験者数名によるセンシング実験を実施し, 少ない観測で両都市の主要部分の地図が構築できたことを示している.

キーワード: Wi-Fi, 都市環境, 電波伝搬シミュレーション, 電波強度地図, AP 位置推定

A Study on Wi-Fi RSSI Map Construction Based on Crowdsourcing and Simulations

TATSUYA AMANO¹ SHUGO KAJITA¹ HIROZUMI YAMAGUCHI¹ TERUO HIGASHINO¹ MINEO TAKAI^{1,2}

Received: May 9, 2017, Accepted: November 7, 2017

Abstract: In this paper, we propose a Wi-Fi radio map construction mechanism using both crowdsourcing and highly-precise radio propagation simulation. Once some cooperative smartphone users collect Wi-Fi beacon data with RSS information, it estimates “tx-tile” for each AP, which is a virtual transmission source on a wall of the building where AP is inside. Using this tx-tile, it executes online Wi-Fi radio propagation simulations with 3D city models to complement RSS information in many other areas that are not covered by the limited number of cooperative users. We have evaluated the tx-tile localization error and the quality of the radio map to show the effectiveness of our method.

Keywords: Wi-Fi, urban environment, radio propagation simulation, radio map, AP localization

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, 訪日外国人がわ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 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になっている.

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

² カリフォルニア大学ロサンゼルス校
University of California, Los Angeles, CA90095, USA

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、車両へ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 1 つとなり、様々な環境での活用が期待されている。

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、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], [3], [4]。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させ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。たとえば移動型 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などで移動したりする場合には 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うえで非輻輳チャンネルを有する AP 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。

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が以前よりなされている [5], [6], [7]。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、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まだまだ十分でないといえる。

本論文ではクラウドソーシングを活用し、スマートフォンユーザーによる AP からのビーコン観測データをクラウドサーバに集約するとともに、シミュレーションを併用して、都市環境における Wi-Fi 信号の受信強度地図 (電波強度地図) を効率良く生成する手法を提案する。提案手法では、多くの AP は屋内あるいは建造物壁面などに設置されていると仮定し、屋外の複数地点における各 AP のビーコンの観測データから、その AP の存在空間や非存在空間を球体で表現する。それらを周辺の建造物の地理情報と組み合わせることで、AP 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の候補ならびに同地点における出力強度を推定する。推定した電波発信点候補を用いて網羅的に電波伝搬シミュレーションを実施し、スマートフォンユーザーのビーコン受信強度に最も一致する電波発信点位置を特定することで、観測データとシミュレーションデータを組み合わせた電波強度地図を構築する。提案手法に基づく電波強度地図サーバならびにスマートフォンアプリを実装し、大阪大学吹田キャンパス内の電波強度地図を構築した。AP 間ハンドオーバーを行うシナリオを用いて電波発信点の位置推定精度および電波強度地図の精度を評価した結果、平均推定位置誤差 14.65 m であり、ランダムに抽出した地点における観測において、実測 RSS と推定 RSS の誤差が、65%の地点で ± 5 dBm に収まった。ハンドオーバーのシナリオでは標準の Android のハンドオーバーと比較して、電波強度地図を利用することで AP 切替えにともなう通信断の回数を抑えることが可能であることを示した。また、大阪市内およびサンフランシスコにおいて被験者数名によるセンシング実験を実施し、少ない観測人数ならびに時間で両都市の主要部分の電波強度地図が構築できたことを確認している。

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。文献 [8] 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。また文献 [9] 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させ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。たとえばクライアントが遠方の 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うる。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「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 1 つとして AP の位置情報は重要であり、AP からの電波の観測データをもとに AP の位置推定を行う手法が研究されている。たとえば文献 [10] 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おり、文献 [11] や文献 [12] は観測者の移動にともなう受信信号強度 RSS (Received Signal Strength) の変化を利用して AP の位置を推定する手法を提案している。文献 [13] 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 RSS の変化から電波の到来方向を推定し、AP の位置を推定している。さらに文献 [14] では RSS 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述べている。これらの手法では、AP の位置を一定精度で推定可能である一方、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ソーシングなどで収集したデータからの位置推定には適していない。またいずれの手法も屋外における観測データから屋内に設置されている AP の位置を推定する環境を想定したものではない。

広範囲にわたって電波地図を構築する手法として一般に war-driving や war-walking がよく知られている。車両や歩行者の収集データにより生成された電波強度地図は主にスマートフォンなど Wi-Fi クライアントの位置推定に用いられる [5], [7], [15]。たとえば Place Lab [5] では war-driving により収集した Wi-Fi のフィンガープリントをクライアン

ト位置推定に利用しており、文献 [16] では war-driving や war-walking など収集方法がデータ精度に与える影響について調査している。またクラウドソーシングにより都市部の Wi-Fi ビーコン観測データを収集し、2 次元地図上にマッピングするサービスも存在する [17]。しかし、war-driving や war-walking を含め、協力者に頼る手法は本質的に協力者数や行動パターンが観測密度が大きな影響を与えることから、広域の都市空間を面的にカバーする情報をすべて協力者に頼ることは現実的といえない。地理情報システムで用いられる Kriging [18], [19] など、観測地点間のデータ補間技術も提案されているものの、都市部の複雑な電波状況を正しく推定することは難しい。

これに対し本研究では、歩行者が持つスマートフォンといった汎用デバイスから集約される情報を活用し、都市 3 次元空間における電波強度地図を生成する点を特徴としている。さらに、協力者数が不足するという問題や、細街路やパティオなど war-driving が困難な地点ではサンプル数が不足するという問題などに対し、限られた観測データから AP の仮想的な位置候補 (電波発信源候補) を 3 次元都市地図を最大限に活用して推定し、それと電波伝搬シミュレーションを組み合わせ、シミュレーションデータと実観測データが最適化する AP の仮想位置を特定する新しい方法論を提案している点で既存手法とは大きく異なる。なお、生成された 3 次元電波強度地図は Wi-Fi クライアントのハンドオーバースケジューリング、新規 AP や既設 AP のチャンネル選択、都市部における非ライセンス帯の混雑可視化やクライアントの位置推定など幅広い応用が可能である。また、Android アプリと地図データベースシステムを構築し、データ収集から可視化までを行うシステムを公開および運用している [20] 点も特徴としてあげられる。

3. システム概要

システムの全体像を図 1 に示す。本システムは、スマートフォンで AP からのビーコンの観測データを収集するスマートフォンユーザ (協力歩行者)、観測データを収集し

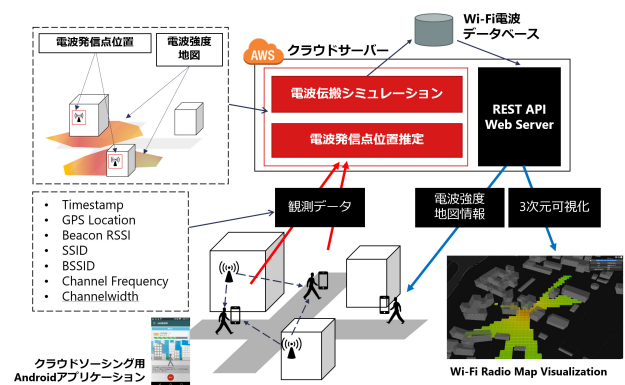


図 1 システム構成図

Fig. 1 System architecture.

AP 位置推定およびシミュレーションにより電波強度地図を生成するクラウドサーバ、生成した電波強度地図や AP の情報を蓄積するデータベースの 3 つの要素から構成される。

本システムの入力となるデータは都市部における AP からのビーコンの観測データである。クラウドソーシングの活用を前提とし、協力歩行者のスマートフォンから得られた都市部のビーコン観測データを収集する。スマートフォンに行わせるチャンネルスキャンにより、各地点で得られた Wi-Fi ビーコンから得られる情報を観測データとよび、その地点をスキャン地点とよぶ。ビーコンの観測データとして収集するのは、スキャン地点において観測された AP のビーコンから取得可能な受信信号強度 (RSS), AP の ESSID および BSSID (MAC アドレス), 使用チャンネル, 使用帯域幅 (20 MHz や 40 MHz など) とする。提案手法では BSSID により AP の識別を行う。我々の開発したデータ収集用 Android アプリケーションは、歩行中や静止中など、様々な状況における観測から可能な限り安定した観測を得るため、加速度センサ、照度センサ、近接センサを用いて端末の状態を検知し、協力者が端末を手に保持して歩いている状態において一定間隔でチャンネルスキャンを行い観測データを収集する。収集した観測データは GPS により取得したスキャン地点の位置情報とともに自動的にクラウドサーバへ送信される。

収集された全 AP の観測データをもとに AP ごとに電波強度地図を生成しデータベースに蓄積する。電波強度地図は屋外の任意の地点における、ある AP からの受信信号強度 (RSS) の値を保持する 2 次元地図である。このような電波強度地図を用いることによって、Wi-Fi クライアントや Wi-Fi AP, Wi-Fi サービスプロバイダは周辺の AP からの希望および非希望波の信号強度を把握することが可能になり、たとえば、Wi-Fi クライアントのチャンネル選択や自律型 AP のチャンネル切替え、サービスプロバイダによる AP のチャンネル最適化などにも活用できる。

電波強度地図にはスマートフォンにより実際に観測された RSS 値と、提案手法が用いる電波伝搬シミュレータにより推定された RSS 値が含まれる。シミュレーションデータに実観測データを組み合わせるデータ同化アプローチにより、実観測データが得られていない地点における RSS 値を補完した電波強度地図を生成する。またデータベースには AP の電波強度地図だけではなく、後述する AP の仮想的な位置 (これを電波発信点とよぶ) も含まれている。

図 2 に示すように、ある AP の電波発信点は、その AP が存在する建造物の壁面のいずれかに AP が存在すると見なした場合の位置である。都市部の道路上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をもとに屋内の実際の AP 位置を推定することは現実的ではな

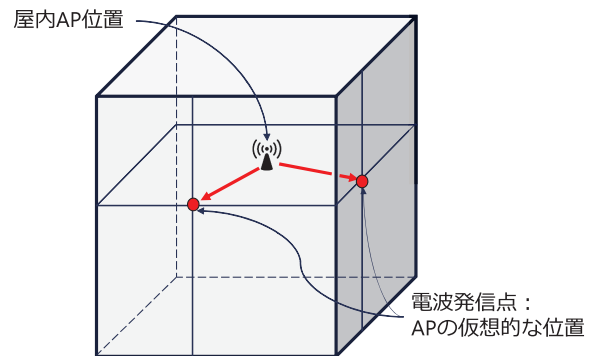


図 2 AP の電波発信点

Fig. 2 Transmission point of an AP.

い。そこで提案手法では、実際の AP 位置ではなく、電波伝搬シミュレーションでデータ補間を行うために必要十分な情報として、建造物壁面上の電波発信点の位置推定を行う。推定には、複数のスキャン地点における当該 AP の RSS 値に基づくシンプルなレンジフリー 3 次元位置推定法を用いる。

以上のように得られた電波強度地図、実観測データ、電波発信点情報、使用チャンネル情報、ESSID/BSSID を、AP およびスキャン地点 (あるいは補間地点) ごとにデータベースに蓄積する。

データベースに蓄積された AP の電波強度地図や ESSID/BSSID, 使用チャンネルなどの情報は、REST API サーバを通して Wi-Fi クライアントに提供される。また電波強度地図は Web アプリケーションを通して 3 次元可視化している。この可視化アプリケーションは、AP の過密度やチャンネル占有状況を把握することができるため、AP の設置箇所選択や既設 AP のチャンネル調整など、様々な用途に利用できる。

4. 電波強度地図の生成法

収集されたある AP の観測データから、電波発信点の位置と電波出力強度を推定し、電波強度地図を生成する手続きは、以下の 3 ステップで構成される。

- (1) 建造物壁面上の電波発信点存在区画の推定
- (2) シミュレーションによる RSS 値と実観測 RSS 値のフィッティングによる電波発信点の推定
- (3) 電波発信点の出力強度の推定

以降では、すべてのスキャン地点のうち、推定対象の AP 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、当該 AP の受信地点の集合を O , 非受信地点の集合を \bar{O} で表す。

電波発信点の存在区画は複数のスキャン地点での RSS 値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 RSS 値から推定される 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

表 1 事前実験の環境

Table 1 Settings of the preliminary survey.

Wi-Fi AP 機種	Buffalo AirStation WHR-300HP
測定端末	LG Nexus 5X
無線 LAN プロトコル	IEEE802.11g
使用チャネル	1

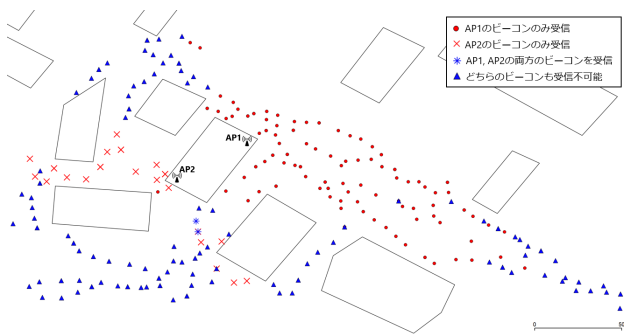


図 3 事前実験での AP 設置個所とスキャン地点

Fig. 3 AP locations and scan points in preliminary survey.

在領域とよ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、RSS 値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 RSS 観測値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 RSS 値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電波発信点の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。

この方針の妥当性を評価するため、同方針で求めた存在領域の半径と、スキャン地点から AP までの実際の距離とを比較した。この目的のため、大阪大学吹田キャンパスの建物の内部に AP1 と AP2 を設置し、周囲の 258 のスキャン地点において、各 AP からのビーコンの RSS 値を取得した。実験環境を表 1 に、AP 設置個所とスキャン地点を図 3 に示す。258 のスキャン地点のうち、AP1 および AP2 のビーコンを観測した受信地点数はそれぞれ 115 および 27 であった。図 4(a) に各受信地点での RSS 値と AP までの実際の距離を示す。

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に、RSS 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。

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

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。事前実験において、送信電力 P_0 を -20 dBm としたとき、自由空間伝搬損失により推定した距離と実距離と関係を図 4 (b) に示す。この図から、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いことが分かる。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に用いる。なお、送信電力 P_0 については、事前実験において自由空間伝搬損失で仮定する送信電力を -50 dBm から -10 dBm まで変化させたときに、AP が存在領域内部に含まれる受信地点の割合がどのように変化するかを測定した。その結果を図 4 (c) に示す。図より、送信電力 -20 dBm を仮定したとき約 90% の存在領域の球の内部に AP が含まれることが読み取れる。提案手法ではこの事前実験のデータをもとに送信電力を -20 dBm と仮定している。

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、 o_r は o における対象 AP からのビーコンの RSS 値 (mW) である。波長 λ は AP が 2.4 GHz 帯、5 GHz 帯を利用する場合、それぞれ 0.125 m、0.06 m である。

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

また提案手法では、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電波発信点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、電波強度地図の生成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

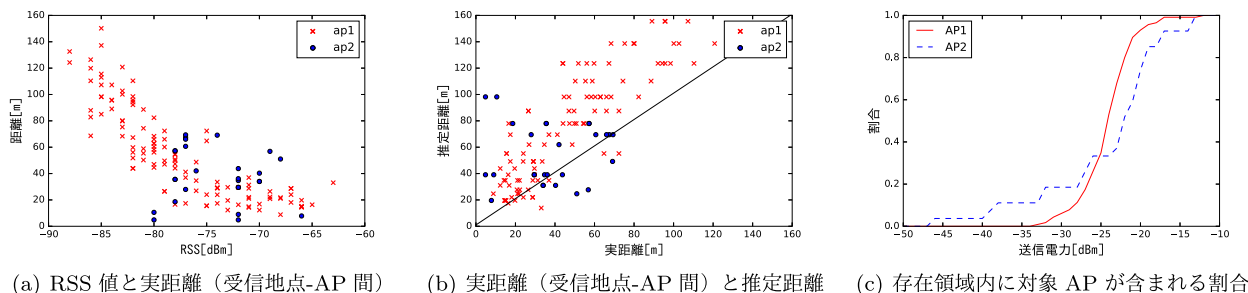


図 4 事前実験結果

Fig. 4 Preliminary survey results.

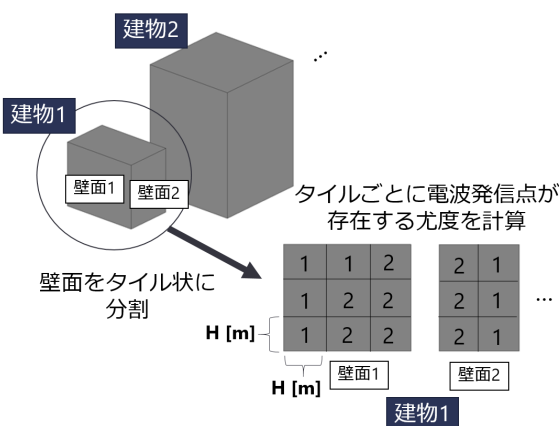


図 5 建造物壁面のタイル
Fig. 5 Tiles of building.

響により非受信地点とされてしまった観測データが発生した場合には、非存在領域が大きくなり、電波発信点位置の誤差が大きくなるといった影響が考えられる。なお、非受信地点は受信地点以外の任意の地点となるため受信地点数と比較して多数となりがちである。したがって、非存在領域を求める非受信地点は、当該 AP の受信地点の重心から Wi-Fi の電波到達を考慮できる常識的な距離（本研究では 200 m）以内の領域内の地点に限定し、無用に多数の領域を扱う負荷を回避している。

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 $S = \{s(o) \mid o \in O\}$ と非存在領域の集合 $\bar{S} = \{\bar{s}(\bar{o}) \mid \bar{o} \in \bar{O}\}$ をもとに建物壁面上の電波発信点の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 5 のようにタイル状に分割し、タイル t ごとに、タイル内部に電波発信点が存在する尤度 $\mathcal{L}(t)$ を式 (3) により求める。

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

ただし、

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

$$f(o_r) = \begin{cases} 9.2 & (o_r \geq -75) \\ 3.5 & (-75 > o_r \geq -83) \\ 1.6 & (o_r < -83) \end{cases}$$

式 (3) の $f(o_r)$ は非存在領域数に対し存在領域数をどの程度信頼するかを表す重みであり、RSS 値に応じて異なる値を用いる。具体的には、RSS の値が大きい受信地点の情報、すなわち半径の小さい存在領域に対しより大きい重みを与える。便宜上、RSS 値をもとに、(i) -75 dBm 以上の受信地点の存在領域をクラス 1、(ii) -75 dBm 未満かつ -85 dBm 以上の存在領域をクラス 2、(iii) -85 dBm 未満の存在領域をクラス 3、とした 3 クラスに分類した重みを用いる。なお、これらの閾値は文献 [15] で用いられているものを利用し、重みについては、大阪市内の実観測データにおける 1,906,339 の受信地点のうち、クラス 1 からクラス 3 に属する数がそれぞれ 207,668、531,598 および 1,167,073 であったため、これらの割合の逆数をそれぞれのクラスの重みとして用いた。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）を電波発信点の存在区画とする。

次に、複数のタイルで構成される電波発信点の存在区画のなかから、実際に電波発信点の位置を決定する。存在区画内部で電波発信点位置を変化させ、それぞれにおい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 RSS 値とシミュレーションで得られた同地点上の RSS 値を比較し、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 2 に示す。対象 AP が 2.4 GHz 帯の場合は IEEE802.11g を、5 GHz 帯の場合は IEEE802.11ac を使用した。

電波発信点の決定手順の詳細は以下のとおりである。まず電波発信点の存在区画内のタイルごとに、タイルの中心に電波発信点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、電波発信点位置 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 RSS 値 o_r に対し、同地点にお

表 2 シミュレーション設定
Table 2 Simulation parameters.

パラメータ	設定
電波伝搬計算モジュール	FUPM
電波伝搬モデル	VPUP
無線 LAN プロトコル	IEEE802.11g or IEEE802.11ac
AP 電波出力強度	-10 dBm

ける電波強度地図 m_p 上のシミュレーションによる RSS 値を $\hat{o}_{m_p,r}$ 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 を電波発信点の位置として決定する.

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

電波発信点の存在区画が, 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 つの電波発信点を設定し, 考えられる電波発信点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) を最小化する複数電波発信点の組合せを電波発信点の位置として決定する.

最後に, 得られた電波発信位置における電波の出力強度を決定する. 電波発信点の位置の決定方法と同様に, 出力強度を変化させてシミュレーションを行い, 得られる各電波強度地図の中で式 (4) を最小化する出力強度を当該電波発信点の出力強度とする. 出力強度は -20, -10, 0, 10 dBm の 4 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, 電波発信点の出力強度として決定する. 位置の決定方法と同様に, ある AP について電波発信点が複数存在する場合は, すべての電波発信点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. 電波強度地図の精度評価

提案手法により生成した電波強度地図の精度を評価するため, 大阪大学吹田キャンパス情報科学研究科棟周辺で実験を行った. AP1 から AP6 までの 6 基の AP を研究科棟内部に設置し, 建物の周辺をスマートフォンを用いて歩行し, 計 296 地点の Wi-Fi ビーコンの観測データを収集した. AP の設置個所とビーコン観測地点を図 6 に, 実験の環境を表 3 に示す. 本実験における AP からの送信電力には, その AP のすぐ近傍で測定した RSS 値を利用した. 296 地点のうちランダムに抽出した 246 地点の観測データを用いて電波発信点の位置推定および電波強度地図生成を行い, 残りの 50 地点の観測データを用いて電波強度地図の精度を評価した. なお B 棟の 7 階に設置した AP4 のビーコンはすべての観測地点で受信できなかったため, 以降は

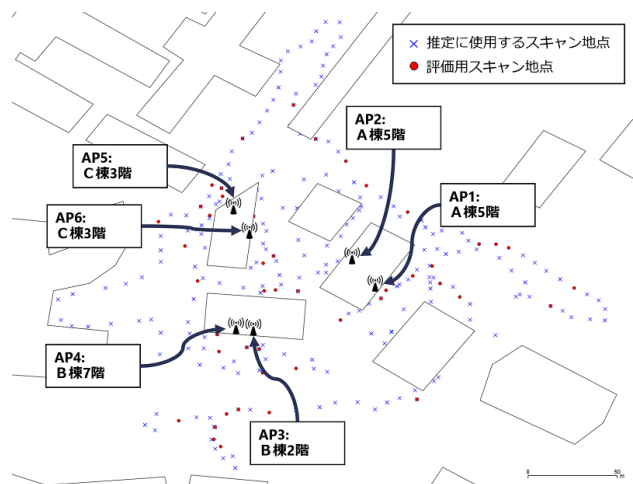


図 6 AP 設置個所とスキャン地点
Fig. 6 AP locations and scan points.

表 3 実験環境
Table 3 Settings of the experiment.

Wi-Fi AP1-4 機種	Buffalo AirStation WHR-300HP
Wi-Fi AP5 機種	Buffalo AirStation WZR-600DHP
Wi-Fi AP6 機種	Buffalo NEINTI WZR-AMPG300NG
無線 LAN プロトコル	IEEE802.11g
観測端末	LG Nexus 5x (Android 6.0)
スキャン地点数	246 地点

表 4 Tx-tile 位置推定誤差
Table 4 Tx-tile localization error.

AP (電波発信点)	位置誤差 (m)
AP1	18.7
AP2 電波発信点-1	10.1
AP2 電波発信点-2	17.4
AP3	2.7
AP5	12.3
AP6	26.7

除外する.

これに対し, まず観測データを用いて提案手法により推定した電波発信点位置の推定誤差を測定した. その結果を表 4 に示す. 位置推定誤差には垂直方向の距離も含めている. また AP 設置個所と推定された電波発信点位置を図 7 に示す. AP はすべて建物の窓際に設置し, 設置した個所を電波発信点の位置の真値としている. AP2 のみ電波発信点の存在区画が建物の複数壁面にわたったため, 各壁面に 1 つずつ対応する電波発信点が存在する. 位置推定誤差の平均値は 14.65 m であり, 誤差最小のケースは AP3 の 2.7 m, 誤差最大のケースは AP6 の 26.7 m であった.

次に, 296 のスキャン地点のうちランダムに選択した 50 地点において RSS を電波強度地図上の推定値と実測値と比較を行うことで, 6 基の AP について電波強度地図の精度の評価を行った. 50 のスキャン地点のうち AP1 から AP6 の受信地点数はそれぞれ 5, 1, 8, 0, 9 であり, 計 29 の

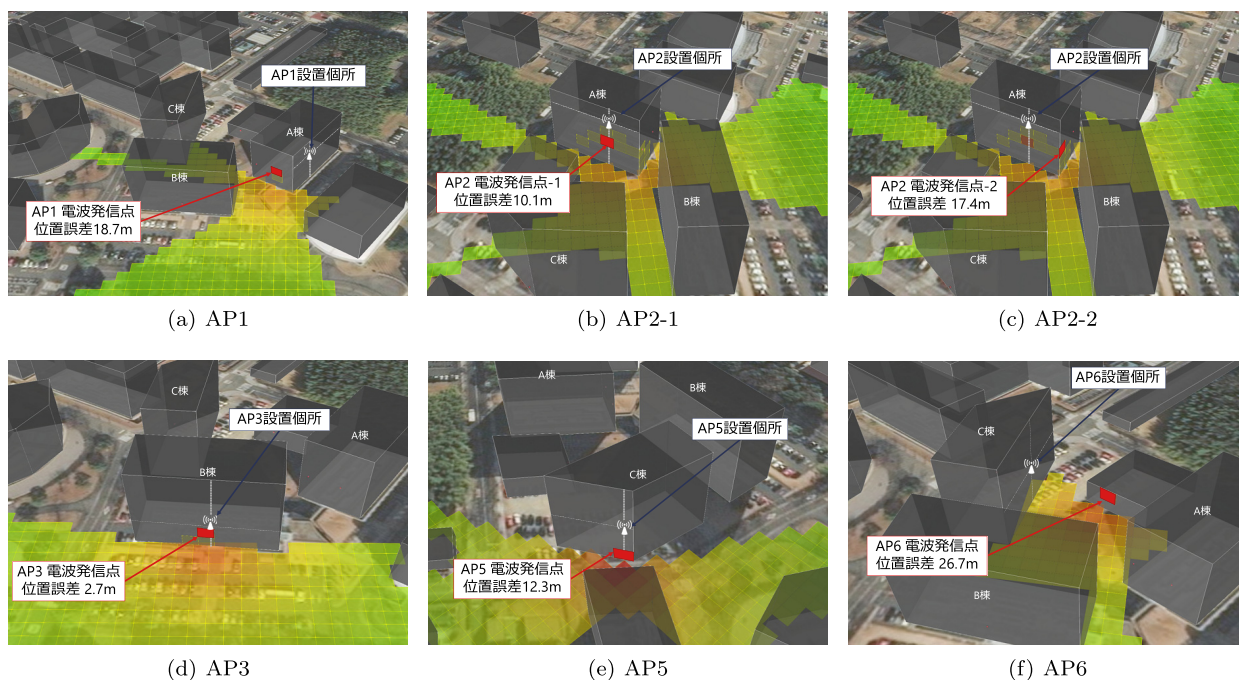


図 7 各 AP の設置個所と電波発信点の推定位置
 Fig. 7 Actual AP locations and estimated transmission points.

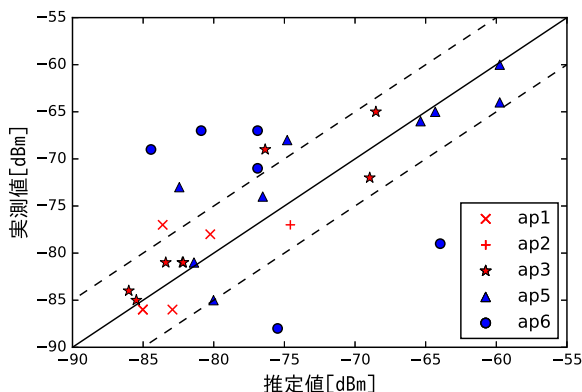


図 8 RSS 推定誤差
 Fig. 8 RSS estimation error.

観測が得られた。これらの観測について、図 8 に推定値と実測値の比較結果を示す。まず、AP6 の誤差が比較的大きいことが読み取れるが、これは AP6 の電波発信点の位置推定誤差が大きいに起因している。しかし、全体として 29 の観測のうち、19 の観測において RSS の誤差が ± 5 dBm 以内に収まっており、次章で述べるハンドオーバスケジューリングや、新規 AP や既設 AP のチャンネル選択、都市部における非ライセンス帯の混雑可視化やクライアントの位置推定など、本研究が目的とする使用用途においては十分な精度であると考えられる。なお、提案手法は観測データ数を重視する設計方針であるため、電波発信点の位置推定誤差の大きいものは観測データ数の増加とともに抑制されていくと考えているが、現在も継続しているデータ収集結果に基づきさらなる検証を実施していく計画である。

6. 電波強度地図の利用実験

我々は電波強度地図を活用した Wi-Fi アクセスポイント選択アプリを Android 上に実装した。本章では、あらかじめ構築した電波強度地図を利用することにより移動型 Wi-Fi クライアントのスループットの向上が見込めることを示す。

Wi-Fi クライアントが歩行や車両などで移動する場合には、Wi-Fi セル間の水平ハンドオーバが発生し、接続切替えにともなう通信断が生じる問題が知られている。こういった状況に対し、Wi-Fi クライアントのハンドオーバ時の通信品質の低下を防ぐ手法について様々な研究がなされている。たとえば SyncScan [21] や Proactive Scan [22] では接続する AP の選択と実際のハンドオーバの処理を分離することで切替えにともなう遅延を抑えている。また文献 [23] や文献 [24] では同一サービスセット内の複数 AP の SSID や MAC アドレス、使用チャンネルを統一することで高速なハンドオーバを行うプロトコルが検討されている。これらの手法では既存の L2 プロトコルに修正を加えるなど、サービス提供者側の事前設定が必要となる。

これに対し、クライアント側のアプリケーションあるいは OS レベルで実際に実装されている Wi-Fi・LTE 垂直ハンドオーバや、AP 間水平ハンドオーバでは、観測 RSS 値の変化に基づく AP や基地局のアドホックな選択が一般的である。たとえば Android 端末など多くの Wi-Fi クライアントでは、現在接続中の AP からの RSS 値が十分に小さくなったタイミングでチャンネルスキャンを行い、次に接続すべき AP をビーコンの RSS 値から決定する。この際、

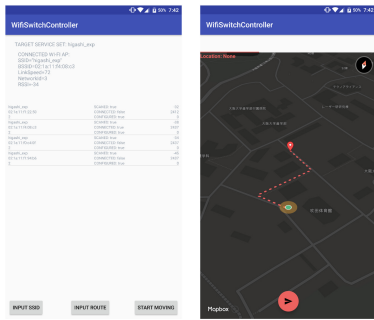


図 9 入力された移動経路と電波強度地図をもとにハンドオーバを行う Android アプリケーション

Fig. 9 Android application for handover control with Wi-Fi radio map.

AP への帰属切替えにかかる時間が無視できず (たとえば Android 端末では数秒から 5 秒程度), この間に L4 接続が失われたり, データ転送そのものが滞ることにつながりかねない.

本章では提案手法の電波強度地図と移動経路情報を利用し, 移動先の電波強度地図をあらかじめ取得し, その通信状況を予測しておくことで, 最適な AP 選択パターンをあらかじめ計算し, AP 切替えを抑制したハンドオーバが可能になることを示し, 電波強度地図と提案手法の可用性を応用例によって示す. 既存のスマートフォンで実験を行うため, 図 9 のようなアプリケーションプロトタイプを構築した. 同アプリケーションでは, ユーザが ESSID と現在位置から目的地までの経路を入力し, 入力された情報とクラウドサーバから取得した当該 ESSID を持つ電波強度地図をもとに経路を移動する際の AP の切替え回数を最小化する AP の接続順のリストを自動生成する. スマートフォンの移動時には, AP のチャンネルスキャンをバックグラウンドで行いながら, 生成リストと現在位置に従って AP 切替えを自動実行する.

6.1 接続 AP リスト生成アルゴリズム

入力された経路情報と電波強度地図から, 接続切替え数を最小化する AP の接続順リストを生成するアルゴリズムについて述べる. 対象の ESSID を持つすべての AP の電波強度地図と Wi-Fi クライアントの移動経路を与え, 移動経路上で接続可能な対象 ESSID を持つ集合 $APs = \{AP_1, \dots, AP_i, \dots, AP_n\}$ から貪欲法に基づいて接続切替え数を最小化する AP の接続順のリスト $\{AP_{(1)}, \dots, AP_{(m)}\}$ を出力する. 経路上での初期位置からの距離を x ($0 \leq x \leq E$) で表し, E は終点までの距離を表す.

前処理として, 電波強度地図と移動経路を用いて, 各 AP_i と接続可能になる, 初期位置からの経路上の距離 S_i , ならびに接続不能になる距離 E_i を求めておく. したがって, 移動距離が $S_i \leq x \leq E_i$ である間は AP_i と通信可能であることを意味する. このもとで, 切替えのタイミング

Algorithm 1 接続切替え数最小化接続 AP リスト生成

Input: $S_1, \dots, S_n, E_1, \dots, E_n, E$

Output: $\{AP_{(1)}, \dots, AP_{(m)}\}$

```

j ← 1, x ← 0
while x ≤ E do
    K ← {k | S_k ≤ x ≤ E_k}
    l ← arg max_{k ∈ K} (E_k - x)
    AP_{(j)} ← AP_l
    j ← j + 1
    x ← E_k
end while
    
```

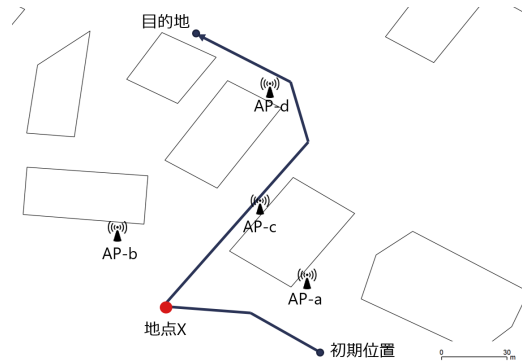


図 10 AP 設置個所と移動経路

Fig. 10 AP locations and walking path.

で $E_i - x$ が最大となる AP_i を選択する切替え方針を採用した. 切替えアルゴリズムの詳細を Algorithm 1 に示す.

Algorithm 1 において, 集合 K は, 経路上の位置 x において接続可能な AP 群を表す. この中で最も遠くの位置まで接続を維持できる AP を選ぶことで, 切替え回数が最小化でき, 最終的に得られた AP のリスト $\{AP_{(1)}, \dots, AP_{(m)}\}$ の順に AP を切り替えることで, 全体として経路上のすべての位置で接続が保証され, かつ切替え数が最小化できる. なお, 上記のリストに従ったハンドオーバにおいても可能な限り Wi-Fi セル端の利用を避けるため, $AP_{(i)}$ から $AP_{(i+1)}$ へ切り替えるタイミングは, $AP_{(i+1)}$ からの実観測 RSS 値が $AP_{(i)}$ からのそれ以上になったときとする.

6.2 実験と評価

実装した Android アプリをインストールしたスマートフォンを用い, 大阪大学情報科学研究科棟周辺でハンドオーバ実験を実施した. 図 10 に示すように, 同一の ESSID を設定した AP-a から AP-d までの 4 基の AP を設置し, 初期位置から目的地までの経路を, それらの AP と通信させながら歩行した. 各 AP は Nexus 5 であり, テザリングにより固定設置型 AP として機能してさせ, 同一の移動体通信事業者の LTE 回線によりインターネットに接続させた. 歩行者が保持するスマートフォンには Nexus 6P を利用し, 設置した AP を介して Amazon Web Service 上のクラウドサーバと通信を行わせた. 移動にともなう帯域の変化を iperf により測定し, Android 搭載スマートフォン

標準機能が実現する AP 切替え（標準切替え）と開発したアプリによる AP 切替え（提案切替え）の 2 種類の通信状況を比較した。iperf は TCP モードでウィンドウサイズを 8 KByte、帯域幅測定間隔を 2 秒として測定した。標準切替えと提案切替えの測定のための iperf による通信が相互に影響を与えることを防ぐため、同時に 2 方式の測定は実施しなかったが、それらを連続して測定し、周辺の Wi-Fi 通信環境がほぼ同じ状態で測定されるようにした。このときそれぞれの測定において、歩行開始からの時間と移動距離を計測しながら歩行し、可能な限り同一速度で移動するようにした。またハンドオーバーにより iperf の接続が切断された場合は、接続可能になり次第すぐに iperf の計測を再開し、接続断中の帯域幅は 0 bps とした。設計したアルゴリズムを利用するにあたり、あらかじめ各 AP の電波強度地図をシステムにより生成し、電波強度地図において通信可能である領域を、経験的に使用端末において通信が困難になる、RSS 値が -82 dBm 以上の領域とした。測定の結果を図 11 に示す。

標準切替えでは、AP-a、AP-b、AP-c、AP-d の順に切替えが生じ、3 回の接続切替えにともなう通信断が生じている。一方で提案切替えでは、AP-a、AP-c、AP-d の切替えが生じ、通信断の回数が 2 回となった。たとえば、図 10 に示す地点 X では AP-a との通信が不可能になり、標準切替えはその地点で RSS 値が最も強い AP-b を選択するが、提案切替えでは、事前の経路情報と電波強度地図に従って AP-c を選択していた。また、全体の帯域幅の平均値は前者が 2.11 MBps、後者が 2.27 MBps であり、7.61% の向上が見られている。さらに、接続切替えにともなう通信切断時間は移動時間全体の 234 秒中、前者が 36 秒、後者が 24 秒であった。特に通話や動画のストリーミングなどのサービスでは通信断がサービス品質を大幅に低下させるため、通信断回数を減少させることが重要であり、電波強度地図がその目的に有効であることを示せたと考える。

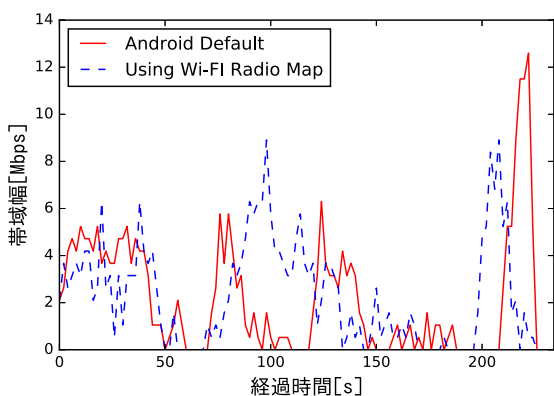


図 11 移動による帯域幅の変化
Fig. 11 Bandwidth change by walking.

7. 都市部における電波強度地図構築への取り組み

提案したクラウドソーシングによるデータ収集と電波強度地図生成システムを実装し、それを用いて大阪市およびサンフランシスコ市において Wi-Fi AP センシングの実験を行った。実装したシステムの概要を図 12 に示す。データ収集用の Android アプリに加え、Wi-Fi 電波データベースの 3 次元可視化を行う Android アプリも作成している。2017 年 5 月現在、データ収集用のアプリは「Wi-Fi 観測隊」として Google Play で公開中であり、生成した大阪市内の一部のデータも一般公開している [20]。電波発信点の位置推定および電波伝搬シミュレーションで利用する 3 次元の都市モデルは OpenStreetMap から取得した。

以下では 2017 年 5 月 9 日までに収集されたデータについて述べる。大阪市およびサンフランシスコ市における総スキャン地点数はそれぞれ 42,022 および 4,517 であり、観測された AP 数は 78,170 および 8,230 であった。大阪市のデータは、梅田を中心とする約 5 km² の領域を網羅しており、依頼した観測者 6 名がそれぞれ 1 日あたり約 4 時間、約 10 km の歩行を行い、3 日間で収集されたものである。観測者は領域内の主要道路すべてを観測アプリを起動したスマートフォンを保持して歩行し、アプリにより約 5 m 間隔でスキャンを行った観測データを取得した。1 名あたり 10 km を 6 名・3 日間で実施した結果、大阪市内の約 5 km² の領域がカバーできたことになり、これは大阪市内全域の約 2% に相当する。単純な見積りでは、協力者 300 名程度を市内各所で均一に募ることができれば、大阪市全域をカバーする高密度な電波強度地図を生成することも可能であると考えられ、適切な報酬（インセンティブ）を設計すれば十分現実的な数字であると考えられる。今後はそういった報酬システムあるいはゲーミフィケーションなどでユーザーを募り、大阪市やサンフランシスコ市などを網羅するデータベースを構築し、様々な応用システムに適用していきたいと考えている。

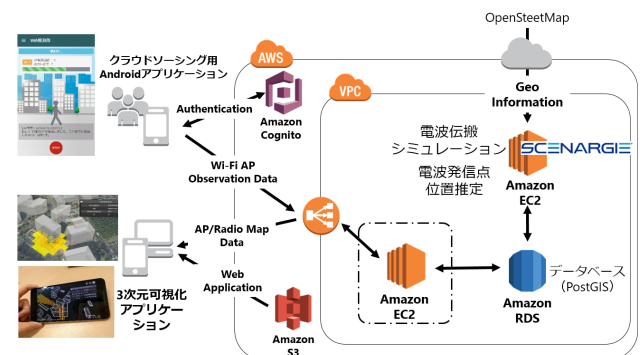


図 12 Amazon Web Service 上へのシステムの実装
Fig. 12 System implementation.

8. まとめ

本論文ではクラウドソーシングを活用し、スマートフォンユーザによる Wi-Fi AP からのビーコンの観測データをクラウドサーバに集約するとともに、シミュレーションを併用して、都市環境における Wi-Fi 信号の受信強度地図（電波強度地図）を効率良く生成する手法を提案した。提案手法では、多くの AP は屋内あるいは建造物壁面などに設置されていると仮定し、屋外の複数地点における各 AP のビーコンの観測情報から、AP 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の候補ならびに同地点における送信電波強度を推定し、推定した電波発信点候補を用いて網羅的に電波伝搬シミュレーションを実施することで電波強度地図を構築する。提案手法に基づく Wi-Fi 電波強度地図サーバならびにスマートフォンアプリを実装し、大阪大学吹田キャンパス内の電波強度地図を構築した。AP 間ハンドオーバを行うシナリオを用いて電波発信点の位置推定精度および電波強度地図の精度を評価を行った。また、大阪市およびサンフランシスコ市において被験者数名によるセンシング実験を実施し、少ない観測人数ならびに時間で両都市の主要部分の電波強度地図が構築できたことを確認している。今後の課題として屋内での観測データや公衆 Wi-Fi AP の位置情報などインターネット上のコンテキストを活用した電波発信点位置の推定精度向上があげられる。また今回提案した手法では屋内に設置された AP を対象としているが、都市部においては屋外設置型の AP も少なからず存在する。ある建物の壁に設置されていれば屋内と同様の方法で位置推定が可能であるものの、電柱など建物の近辺にない AP については、無理にいずれかの建物壁面であると推定してしまうことで誤差拡大の要因となりうる。これに対しては、RSS の大きさで設置の屋内外を推定する方法を考案することを検討している。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP15H02690 ならびに JP26220001 の助成を受けたものです。

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., Yamaguchi, H., Higashino, T., Umehara, S., Saitou, F., Urayama, H., Yamada, M., Maeno, T., Kaneda, S. and Takai, M.: A Channel Selection Strategy for WLAN in Urban Areas by Regression Analysis, *Proc. IEEE 10th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2014)*, pp.646-651 (2014).
- [3] 梶田宗吾, 山口弘純, 東野輝夫, 梅原茂樹, 齊藤文哉, 浦山博史, 山田雅也, 前野 誉, 金田 茂, 高井峰生: 過密干渉環境における無線 LAN チャネルの性能予測モデル, 情報処理学会論文誌 (IPJS), Vol.57, No.2, pp.745-755 (2016).
- [4] Kajita, S., Amano, T., Yamaguchi, H., Higashino, T. and Takai, M.: Wi-Fi Channel Selection Based on Urban Interference Measurement, *Proc. ACM 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQ 2016)*, pp.143-150 (2016).
- [5] LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., Hightower, J., et al.: Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild, *Pervasive Computing*, Vol.3468, pp.116-133, Springer (2005).
- [6] Koo, J. and Cha, H.: Localizing WiFi Access Points Using Signal Strength, *IEEE Communications Letters*, Vol.15, No.2, pp.187-189 (2011).
- [7] Jiang, Q., Ma, Y., Liu, K. and Dou, Z.: A Probabilistic Radio Map Construction Scheme for Crowdsourcing-based Fingerprinting Localization, *IEEE Sensors Journal*, Vol.16, No.10, pp.3764-3774 (2016).
- [8] Mhatre, V., Papagiannaki, K. and Baccelli, F.: Interference Mitigation Through Power Control in High Density 802.11 WLANs, *Proc. IEEE 26th International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp.535-543 (2007).
- [9] 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. IEEE 26th International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp.1451-1459 (2007).
- [10] Satoh, H., Ito, S. and Kawaguchi, N.: Position Estimation of Wireless Access Point Using Directional Antennas, *Location- and Context-Awareness*, Vol.3479, pp.144-156, Springer (2005).
- [11] 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, pp.99-108, Springer (2009).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] Tsui, A.W., Lin, W.-C., Chen, W.-J., Huang, P. and Chu, H.-H.: Accuracy Performance Analysis between War Driving and War Walking in Metropolitan Wi-Fi Localization, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.9, No.11, pp.1551-1562 (2010).
- [17] WiGLE - Wireless Network Mapping, available from (<https://wigo.net>) (accessed 2017-05-09).
- [18] Stein, M.L.: *Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging*, Springer (1999).
- [19] Zhao, H., Huang, B. and Jia, B.: Applying Kriging Interpolation for WiFi Fingerprinting Based Indoor Position-

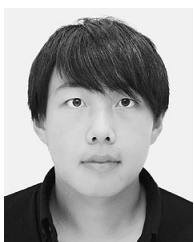
ing Systems, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2016)*, pp.1-6, IEEE (2016).

- [20] Wi-Fi Scan Map of Osaka City, available from (<http://www.wifibigdata.org>) (accessed 2017-05-09).
- [21] Ramani, I. and Savage, S.: SyncScan: Practical fast handoff for 802.11 infrastructure networks, *Proc. IEEE 24th Annual Joint Conference on Computer and Communications (INFOCOM 2005)*, Vol.1, pp.675-684, IEEE (2005).
- [22] Wu, H., Tan, K., Zhang, Y. and Zhang, Q.: Proactive Scan: Fast Handoff with Smart Triggers for 802.11 Wireless LAN, *Proc. IEEE 26th International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp.749-757, IEEE (2007).
- [23] Ahmed, N., Keshav, S. and Papagiannaki, K.: Omni-Voice: A Mobile Voice Solution for Small-scale Enterprises, *Proc. ACM 12th International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2011)*, p.5, ACM (2011).
- [24] Lv, P., Wang, X., Xue, X. and Xu, M.: SWIMMING: Seamless and Efficient WiFi-Based Internet Access from Moving Vehicles, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.14, No.5, pp.1085-1097 (2015).



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学科卒業。同年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程進学。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。



梶田 宗吾 (学生会員)

平成 26 年大阪大学基礎工学部情報科学学科卒業。平成 28 年同大学大学院博士前期課程修了。平成 28 年同大学院博士後期課程入学。平成 29 年日本学術振興会特別研究員 DC2。Wi-Fi におけるチャンネル干渉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科学学科卒業。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。



高井 峰生 (正会員)

平成 9 年早稲田大学大学院博士後期課程修了。平成 19 年米国法人スペースタイムエンジニアリング設立。現在, カリフォルニア大学ロサンゼルス校主幹開発研究員ならびに大阪大学大学院情報科学研究科招へい准教授。モバイル通信システムおよびその評価方法についての研究に従事。ACM, IEEE 各会員。