

3次元空間上のWi-Fi電波強度推定・可視化システム

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

概要：

本稿では我々が開発している、スマートフォンによるWi-Fiアクセスポイント（AP）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Wi-Fi信号の受信電波強度を3次元空間における地表面の各地点で推定するシステムについて述べる。本システムは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、周辺の各地点の受信電波強度を得る。スマートフォン上でビーコン観測を行うアプリを開発し、それを用いて大阪大学情報科学研究科周辺で14地点での観測データから推定を行った結果、同研究科の5台のAPからの受信電波強度を22の観測のうち15において $\pm 5\text{dBm}$ 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。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。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、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、モバイルルーターの急増などにより、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および送信電力制御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]。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の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のような移動型通信端末や、モバイルルーターのような移動型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。

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[4]。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

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 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

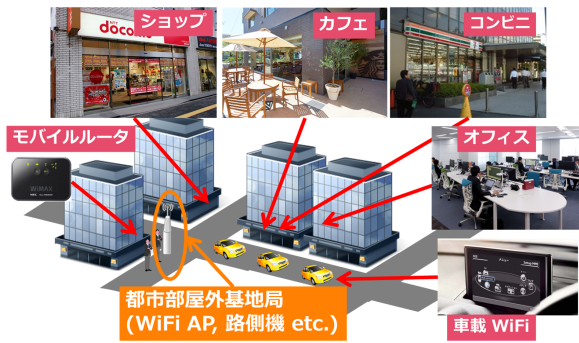


図 1 都市部における Wi-Fi

術は未だ十分でないといえる。

本稿では、スマートフォンユーザーによる AP 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システムを提案する。本システムでは、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、その AP 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、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。その情報と建造物情報（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、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、可視化することもできる。

スマートフォン上でビーコン観測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周辺の 14 地点で観測を行った。そのデータを元に電波発信点を推定し、シミュレータ Scenargie [6] 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、同研究科の 5 の AP からの受信電波強度を 22 の観測のうち 15 において $\pm 5\text{dBm}$ の範囲で推定できた。

2. Wi-Fi 観測データ収集システムの概要

本稿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 AP からのビーコンの受信強度、AP の MAC アドレスおよび 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 AP 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。収集した観測データから、AP の存在空間を推定し、周辺の建造物の地理情

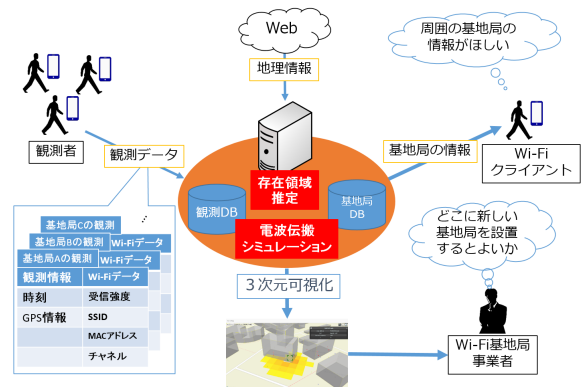


図 2 提案する Wi-Fi 観測データ集約システム

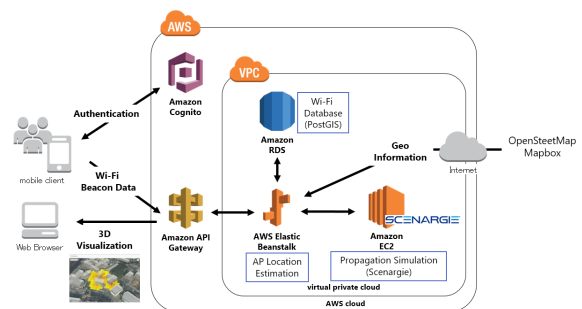


図 3 クラウドサービスを用いたシステムの実装

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。推定した受信電波強度は 3 次元地図上に可視化する。実装には Amazon Web Service (AWS) を利用する。AWS を利用したシステムのアーキテクチャを図 3 に示す。

3. 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。本システム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。

3.1 AP に対応する電波発信点の推定

提案するシステムでは図 4 に示すように観測データを元に各 AP 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 AP の建物表面における発信点を求める。

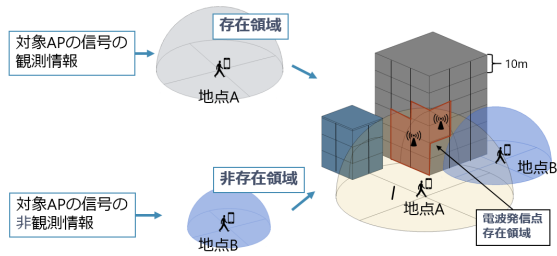


図 4 各 AP に対応する電波発信点の位置推定

AP 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 AP 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。AP の非存在領域の球は、その AP 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。

3.1.1 AP の存在空間

AP 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 AP 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。

球の半径はある観測地点での対象 AP からの信号の受信強度 RSS から自由空間伝搬損失モデルに基づいて計算した AP と観測端末間の距離であり、中心は観測地点の緯度、経度である。自由空間における AP からの電波の端末での受信電力 P_r は式 (1) で求めることができる。ここで P_t は AP 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。

$$P_r[W] = \frac{P_t G_t G_r}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2} \quad (1)$$

さらに実際の AP 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、AP 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。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の半径は対象 AP の存在可能範囲の上限を表す。

3.1.2 AP の非存在空間

対象 AP $_j$ 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 AP $_j$ の非存在領域について説明する。まず AP $_j$ から送出された信号を観測していない観測地点の集合 $\bar{O}_j$ を定める。そして集合 $\bar{O}_j$ の要素である AP $_j$ の信号非観測地点 i の緯度および経度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 AP $_j$ 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 AP 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。

3.1.3 建物側面における発信点推定

観測地点の周囲の建物のすべての側面を図 4 に示すように 10m 四方の区画に分割し、それぞれの区画ごとに対象 AP の電波発信点の存在する尤度を計算する。区画 a の尤度の初期値を 0 とし、区画 a が AP の存在領域の球と交差すれば値を 1 増やし、AP の非存在領域の球と交差すれば値を 1 減らす。このようにして尤度を計算し、最も大きい尤度をもつ区画を区画を AP の発信点存在区画とし、その中心を電波発信点の位置とする。

3.2 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 AP 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、AP 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。

AP 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 AP $_j$ からの受信強度が得られる。建物の壁面に存在する仮想的な AP をシミュレーション上の AP として設定する。AP 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。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。

以上のように電波発信点の位置とその出力電波強度を決定し、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。

4. 実験と評価

観測データを蓄積するデータベースを設計し、観測データおよび観測データから推定した AP の存在領域と周辺地点での AP からの受信強度を可視化するシステムを試作した（図 5）。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 AP 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システムの手法の評価を行った。

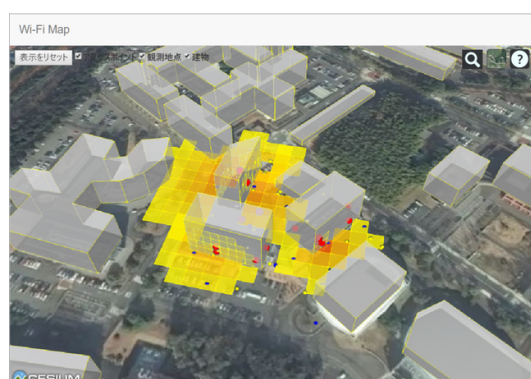


図 5 Wi-Fi データベースの3次元可視化

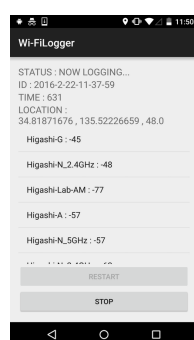


図 6 測定用のログアプリケーション

4.1 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APを設置した。A棟は6階建てで高さ25m、B棟、C棟はともに7階建てで高さ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7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AP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。

4.2 評価結果

観測データから推定したAP1からAP5までの各APの存在領域およびそれらのシミュレーション上でのAPの位置を図8に示す。建物の壁面上の黄色い領域が推定されたAP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8(b), 8(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APがシミュレーション上でAP2として設定するAPの位置となる。AP1以外のAPについては実際のAPの設置箇所が推定した存在領

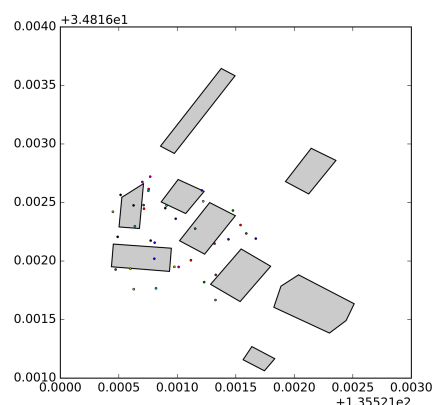


図 7 AP の設置箇所と観測地点

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APの出力強度および周辺での受信強度を推定した。推定したデータを用いて作成した電波強度マップを図10に示す。さらにAP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、AP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。実際の観測を地点での受信強度の比較を図9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 $\pm 5dBm$ 以内に収まっていることがわかる。

5. おわりに

本稿では、我々が開発しているスマートフォンによるWi-Fiビーコンデータの収集と収集したデータに基づくAPの電波発信点位置推定とシミュレーションの結果の可視化システムについて紹介した。実際にシステムの実装を行い、クラウドソーシングにより不特定多数の協力者から収集したデータを用いてシステム稼働させる予定である。

謝辞

本研究開発は総務省SCOPE(受付番号165007009)の委託を受けたものです。また、本研究の一部はJSPS科研費JP16KT0106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 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 Network-*

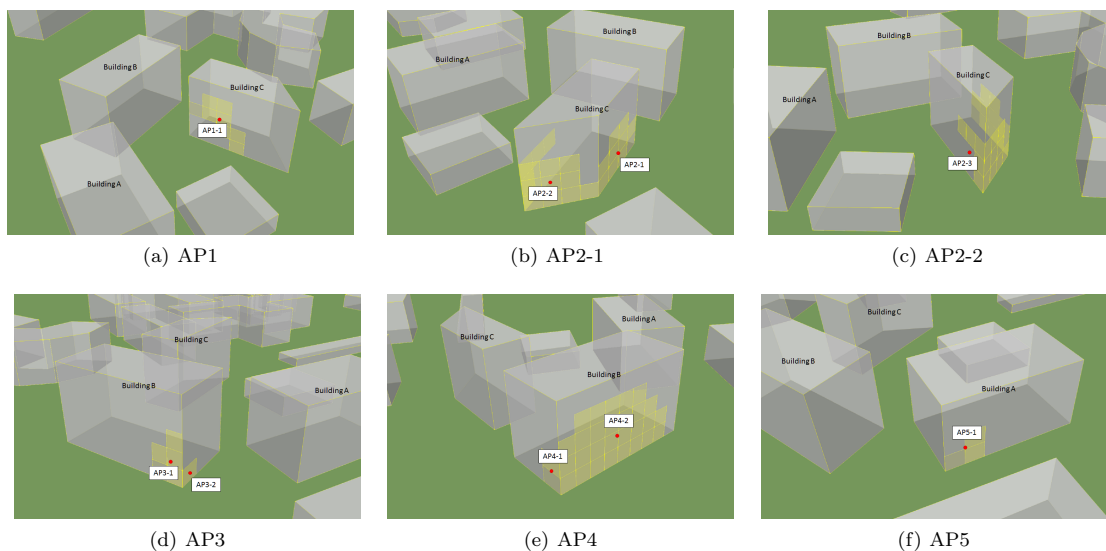


図 8 推定された電波発信点の位置

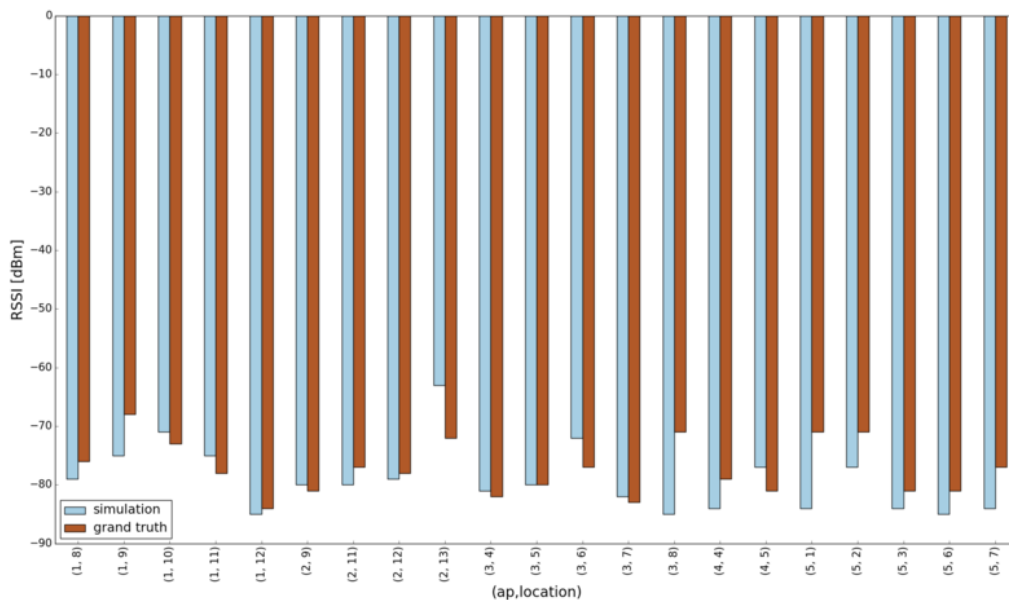


図 9 実測値とシミュレーションによる値の比較

- ing 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] 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 (2016).
- [5] 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).
- [6] Space-Time Engineering, LLC: Scenargie (Online).

<http://www.spacetime-eng.com/> (参照：2016/2/16) .

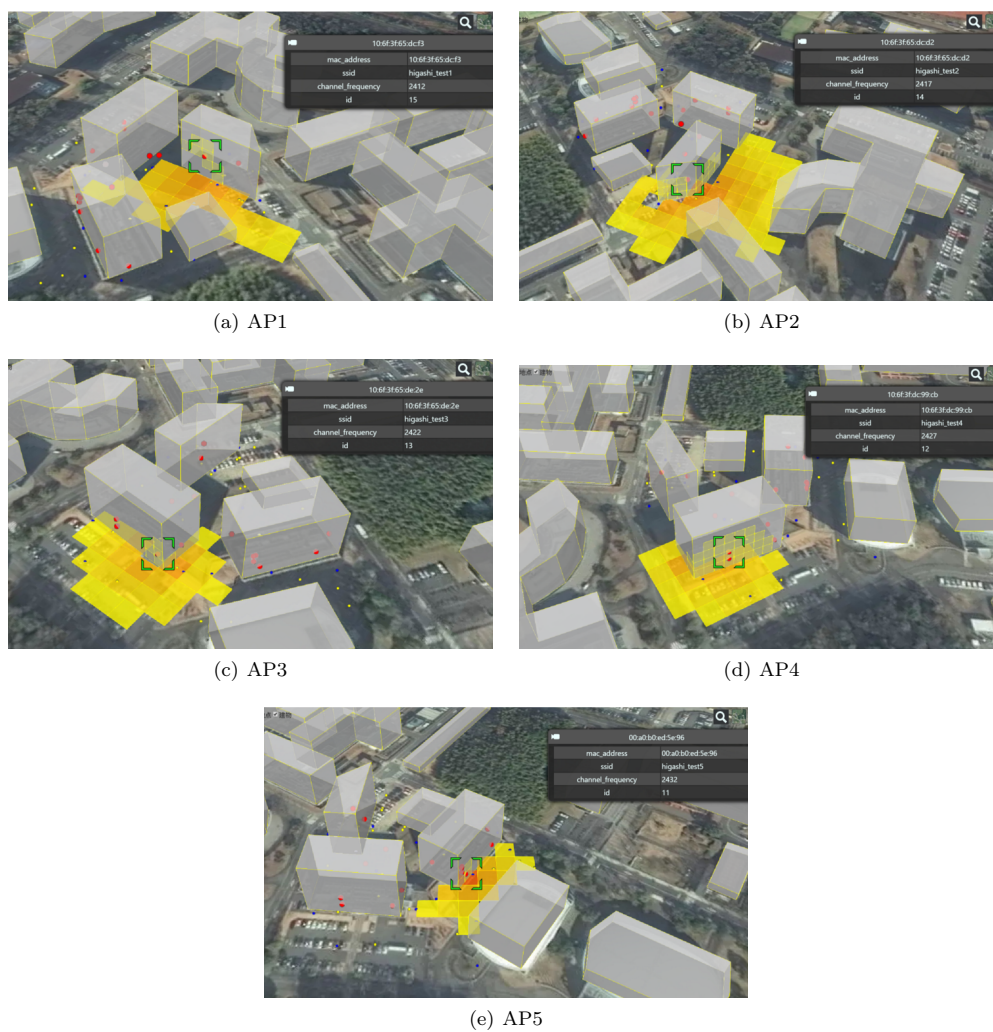


図 10 推定された各 AP の受信強度の 3 次元可視化