

VRによる都市空間 Wi-Fi の可視化と ユーザ体感品質の調査手法

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}

概要: 我々の研究グループでは少数ユーザによるクラウドソーシングを活用してスマートフォンによる Wi-Fi チャンネルスキャン情報を集約し, 地表面での Wi-Fi の受信信号強度 (RSSI) を推定し, 実際にデータが得られていない地点の RSSI も補完された電波強度地図を生成するシステムを構築しており, 現在までに東京都秋葉原あと大阪市内のそれぞれ約 0.5km² および約 5km² の領域を中心にデータ収集を行い, Wi-Fi アクセスポイント (AP) の情報とその電波強度地図を含んだ Wi-Fi データベースを構築している. それらの情報は実際の街区における Wi-Fi 通信環境の再現等に有用であるが, 例えばユーザの移動に伴うスマートフォンアプリの体感品質を実際の利用環境に即して調査したい場合, Wi-Fi データベースに基づく現実環境の Wi-Fi 通信環境を再現し提供するとともに, 現実環境内のユーザの振る舞いもエミュレートできることが望ましい. そこで本研究では, 構築した Wi-Fi データベースと, ゼンリン社が提供する 3 次元都市モデルを用いて VR (Virtual Reality) 空間上に都市環境および Wi-Fi の電波伝搬環境を再現する. VR 上では, 開発したスマートフォンアプリの画面表示とリアルタイム操作を可能とする. これらにより, 複数の公衆 Wi-Fi サービスが混在する環境においてユーザの現実環境の振る舞いに応じたアプリケーション QoE を VR 空間上で調査可能とする手法を提案する. 秋葉原の都市環境を VR 空間上に再現し, ハンドオーバーが頻繁に起こるような環境下で様々な AP 選択方式の下での動画アプリのテストを行った結果, 実験を行った場所においては 5GHz 帯の AP を優先的に利用することで動画の停止回数が約 67%に減少し, 体感品質が向上することを確認した.

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, パブリックスペースにおける Wi-Fi の重要性は従来になく増している. スマートフォンの普及を受け, 今後は例えばマラソンで沿道の観戦者が自視点の映像をスマートフォンでリアルタイム中継しながら他の視点からの映像を同時受信し, 競技全体の進行を映像で把握しながら観戦するような状況も想定される. 特に Wi-Fi 接続時には十分な帯域を前提とした通信を行うスマートフォンアプリも多いため, 大量のユーザが同時に大量の映像データストリームを生成してやり取りするようなヘビートラフィック環境においても, 通信サービスプロバイダは安定した品質 (QoS) を提供できることが望ましい. このような Wi-Fi 可用性向上の課題に対し, 我々は干渉環境センシングのコンセプトに基づく Wi-Fi アクセスポイント (AP) チャンネル選択により干渉を制御し, IEEE802.11a/g/n など既存アーキテクチャの範疇で各 AP の周波数利用を自律的に効率化させる

技術を開発してきている [1].

しかし, これを含め既存の AP 効率化技術の多くは 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 クライアントのサービス品質を常時保証するものではない. 例えば AP を密設置した領域ではカバーエリア拡大の利点は生じるものの, AP 密設置環境の「Wi-Fi セル端」に存在するにおいて多数の AP からの干渉波に晒されることにより CSMA 通信機会損失やフレーム損失が発生する. さらに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. 一方で, 802.11ai や 802.11k に基づく Wi-Fi Vantage [2] など AP 検出や選択・認証を高速化し, AP 間のハンドオーバー時の QoE を向上させる取り組みもなされている. いずれの場合も, アプリケーション提供者はそのような環境でユーザが求める体感品質 (QoE) が実現できるかを検証する必要性が生じる. しかし, 現実環境を再現してそれらの取り組みの効果や実際の QoE を調査するのは容易でない.

この「現実環境の再現問題」に対し, Wi-Fi 通信状況を観測して地点ごとにデータベース化し, 接続品質予測に活

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

用する試みもなされている。我々の研究グループでは少数ユーザによるクラウドソーシングを活用してスマートフォンによる Wi-Fi チャンルスキャン情報を集約し、地表面での Wi-Fi の受信信号強度 (RSSI) を推定し、実際にデータが得られていない地点の RSSI も補完された電波強度地図を生成するシステムを構築している [3]。現在までに東京都秋葉原あと大阪市内のそれぞれ約 0.5km² および約 5km² の領域を中心にデータ収集を行い、広範囲にわたる Wi-Fi アクセスポイント (AP) の情報とその電波強度地図を含んだ Wi-Fi データベースを構築している。またそれらのデータのうち一部を一般に公開している [4]。この Wi-Fi データベースは実際の街区における Wi-Fi の可用性調査に有用であるものの、被験者を用いてアプリの体感品質を実際の利用環境に即して調査したい場合には、ユーザ側には現実環境を提供し、アプリには Wi-Fi データベースに基づく通信環境を提供する必要がある。

そこで本研究では、我々が構築した Wi-Fi データベースと、ゼンリン社が提供する 3 次元都市モデルを用いて VR (Virtual Reality) 空間上に都市環境および Wi-Fi の電波伝搬環境を再現する。VR 空間上では、開発したスマートフォンアプリの画面表示とリアルタイム操作を可能とする。これらにより、複数の公衆 Wi-Fi サービスが混在する環境においてユーザの現実環境の振る舞いに応じたアプリケーション QoE を VR 空間上で調査可能とする手法を提案する。現実の都市環境とそこでの Wi-Fi 環境を同時に VR 空間上で再現することにより、都市の任意の地点における Wi-Fi サービスの QoE の調査を、天候や交通状況といった環境要因に左右されることなく、また実地へ赴かずに行うことが可能になり、多数の被験者を集めた試験なども可能である。また、スポーツイベント向けのアプリや、位置情報ゲーム、ナビアプリ・AR など場所依存アプリの開発者は、Wi-Fi AP が混在し、ハンドオーバーが頻繁に起こるような環境下での通信部分の実装の性能や適応性の調査なども実現できる。

秋葉原の都市環境を VR 空間上に再現し、ハンドオーバーが頻繁に起こるような環境下で様々な AP 選択方式における動画アプリのテストを行った結果、実験を行った場所においては 5GHz 帯の AP を優先的に利用することで動画の停止回数が約 67% に減少し、アプリの体感品質が向上することを確認した。

2. 関連研究

過密な AP 設置に対して動的にキャリアセンス閾値の調整を行うなど、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。[5] 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。[6] 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。

また、Wi-Fi セル間のハンドオーバーが発生し、接続切替えに伴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ー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。例えば SyncScan [7] や Proactive Scan [8] では接続する AP の選択と実際のハンドオーバーの処理を分離することで切替えに伴う遅延を抑えている。また [9] や [10] 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ー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 垂直ハンドオーバーや、AP 間水平ハンドオーバーでは、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。例えば 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、AP への帰属切替にかかる時間が無視できず (例えば 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。

このような問題に対して、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「通信環境コンテキスト」を提供するデータベースを構築し活用する研究もなされている。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。例えば [11] 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、[12] や [13] は観測者の移動に伴う RSSI 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。[14] 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 [15] 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。

通信環境データベースの構築を目的とし、広範囲にわたって電波強度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 [16–18]。例えば Place Lab [16] 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、[19] 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 [4, 20]。このようなデータベースは都市環境における Wi-Fi の電波伝搬環境の調査に有用であるものの、被験者を用いてアプリの体感品質を実際の利用環境に即して調査したり、Wi-Fi AP が混在し、ハンドオーバが頻繁に起こるような環境下での通信部分の実装の性能や適応性の調査を行う場合には、ユーザ側には現実環境を提供し、アプリには Wi-Fi データベースに基づく通信環境を提供する必要がある。

スマートフォンアプリなどいわゆるモバイルアプリケーションの試験について、様々なドメインにおける手法が提案されてきている。例えば、[21] ではスマートフォン UI の高齢者向けのユーザビリティ試験を行う手法について述べており、[22] では Android アプリをシミュレートされたネットワーク上で試験することを可能とするプラットフォームを開発している。総合的なモバイルアプリケーション試験手法については [23] の調査が詳しい。具体的にはテストのフェーズは機能テスト、ラボ環境でのテスト、性能試験、ネットワーク遮断試験、ユーザビリティ、セキュリティ、位置テストなど現実環境を想定した多岐にわたる試験を実施する。特に現場の通信環境や想定される移動速度などを再現しながら、アプリケーションのユーザー体感品質をラボ環境で行うことは一般的に容易でない。

一方で、近年の VR 関連技術の発展にともない、VR アプリケーションにおけるユーザインターフェースに関して様々な研究がなされている。[24] では Google Cardboard プラットフォーム上でスマートフォンの磁気センサを利用した、磁石を用いた入力方式について研究を行っている。また VR 空間上に都市環境を再現し、その仮想空間上で検証や実験を行う取り組みもなされている。[25] では、VR 空間上に目的地発見ゲームを構築し、迷い行動の検出に必要な特徴量の選択に活用している。[26] でも同様に都市環境を再現し、人の空間認識能力について VR 空間上での計測実験を行っている。本研究では、VR (Virtual Reality) 空間上に都市環境および Wi-Fi の電波伝搬環境を再現し、Wi-Fi 通信環境やその通信環境下におけるスマートフォンアプリの QoE を調査する手法を提案する。

3. システム概要

VR による都市環境および Wi-Fi 環境の再現を行うシステムの概要を図 1 に示す。

システムの入力となるのは 3 次元都市モデルと Wi-Fi データベースから得られる都市部の Wi-Fi AP の位置およびその AP の電波強度マップである。3 次元都市モデルにはゼンリン社の提供する Unity 向け 3D 都市モデルデータ「ZENRIN City Asset」を利用する。

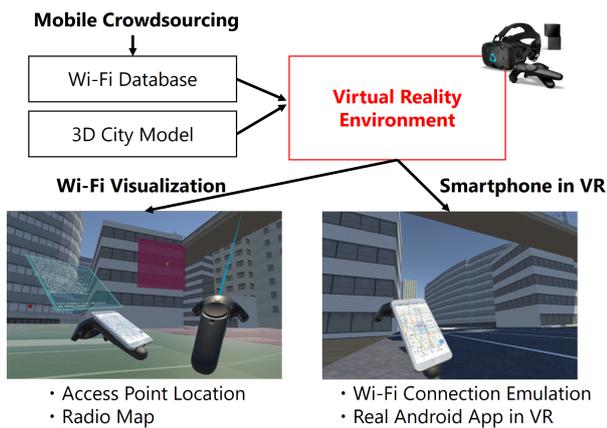
Wi-Fi データベースは、クラウドソーシングによりスマートフォンユーザから収集した情報をもとに、我々が既に構築している 3 次元の AP 位置データベースの構築手法 [3] を用いて生成される。

このクラウドソーシングでは、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。我々の開発したクラウドソーシングにおけるデータ収集用 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 Wi-Fi 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 (RSSI) の値を保持する 2 次元地図であ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 RSSI 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 RSSI 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 RSSI 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、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。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 が存在するとみなした場合の位置である。

システムはこれらの入力をもとに VR 空間上に Wi-Fi の可視化および都市環境の再現を行う。Wi-Fi の可視化では電波発信点の位置と選択した AP の電波強度地図を図 1(a) に示すように 3 次元の都市モデルに重畳して表示する。電波強度地図は各地点におけるその AP からの RSSI に応じたヒートマップとして表す。

VR 空間上への都市環境の再現では、図 1(b) のように実



(a) VR による Wi-Fi の可視化および都市空間再現システム



(b) VR 空間へのスマートフォンの反映

図 1 システム概要

空間のスマートフォンの画面を VR 空間上のスマートフォンの画面に投影することにより、VR 上においてもスマートフォンを利用可能にする。この実世界と VR 空間上におけるスマートフォン端末をそれぞれ実スマートフォン、仮想スマートフォンと呼び、同様に実世界において VR を利用しているユーザを実ユーザ、VR 空間内における実ユーザが操作するオブジェクトを仮想ユーザと呼ぶ。実ユーザがいる地点の緯度経度に対して、VR 空間内に再現した都市空間上における仮想ユーザの緯度経度を仮想位置とし、この仮想位置を実スマートフォンへ反映させることにより、地図アプリケーションやナビアプリ・位置情報を活用したゲームアプリケーションを VR 空間内でも利用可能にしている。また仮想位置において仮想スマートフォンが観測する周囲の Wi-Fi AP からの RSSI を Wi-Fi データベースから取得し、その情報に基づいて Wi-Fi の接続切り替えを実スマートフォン上で行うことによって、仮想スマートフォンの Wi-Fi 接続状況のエミュレーションを行う。

利用する VR デバイスおよびシステムとしては HTC Vive を想定する。この VR システムでは 2 基のベースステーションから出る赤外線レーザーにより VR ヘッドセットと 2 基の VR コントローラの位置がトラッキングされ、実空間における VR ヘッドセットからみた VR コントローラの相対的な位置が、VR 空間上での仮想ユーザの視点からみた VR 上のコントローラの位置に反映される。

以降、4 章で Wi-Fi データベースを構築するシステムについて、手法の詳細およびシステムにより生成した電波強度地図の精度の評価結果を示す。さらに 5 章で、都市の 3 次元モデルや環境情報および構築した Wi-Fi データベースを用いて VR 上に都市環境を再現する方法について述べる。

表 1 電波発信点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
AP's Phy Protocol	802.11g or 802.11ac
Transmission Power	-10 dBm
Max Signal Propagation	100.000 km
Antenna Pattern	Isotropic Antenna
City Model	Open Street Map

4. Wi-Fi データベース

4.1 Wi-Fi データベースの構築手法

提案システムでは Wi-Fi データベースの構築手法として、我々がすでに構築している [3] をもとにした手法を用いる。

当該システムでは、まずクラウドソーシングを活用したスマートフォンユーザによる実環境における Wi-Fi ビーコン観測データの収集を行う。その後、収集したデータをもとに、都市環境における AP の仮想的な位置の推定を行う。クラウドソーシングによる観測データ収集には開発したシステム用の Wi-Fi データ収集アプリケーションを利用する。このアプリケーションはユーザの移動に合わせて自動的に一定の間隔でチャンネルスキャンを行う。スキャン地点で得られた 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 (20MHz や 40MHz など)、GPS により取得するスキャン地点の位置情報が観測データに含まれる。アプリケーショ

ンは一定間隔でこれらのデータをクラウドサーバへ送信する。システムは BSSI により AP の識別を行う。

システムは送られてきたこれらのデータを用いて AP ごとに仮想的な AP の位置である電波発信点と電波出力強度を推定する。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 RSSI と実観測 RSSI 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

電波発信点の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 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。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。自由空間伝搬損失をもとにした、RSSI の値 (mW) を r としたときの存在領域の球の半径 R は式 (1) により求める。ここで λ は波長 (m) である。AP の送信電力は [3] の事前実験の結果をもとに -20 dBm と仮定している。

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{10^{-2}}{r}} \quad (1)$$

また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。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。非存在領域の球の半径は経験的に 10m とする。

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 \bar{S} と非存在領域の集合 \bar{s} 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タイル状に分割し、タイルごとに、タイル内部に電波発信点が存在する尤度 $\mathcal{L}(t)$ を式 (2) により求める。

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(t) &= \sum_{s \in \bar{S}} \text{intersects}(t, s) - \sum_{\bar{s} \in \bar{s}} \text{intersects}(t, \bar{s}) \end{aligned} \quad (2)$$

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) を電波発信点の存在区画とする。

$$\min_{p \in P} \frac{1}{|P|} \sum_{i \in I} |\hat{R}_{m_p, i} - R_i| \quad (3)$$

電波発信点の決定手順の詳細は以下の通りである。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。シミュレーションにはネットワークシミュレータ Scenargie を、シミュレーションのパラメータは表 1 のものを用いる。[3] とは異なり、パスロス計算モデルには Triple Path Geodesic を利用する。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 $i \in I$ での観測 RSS 値 R_i 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 RSS 値を $\hat{R}_{m_p, i}$ で表す。式 (3) に示すように各電波強度地図 m_p について受信地点で得られている観測データとの誤差を計算し、それを最小化する発信点位置 p を電波発信点の位置として決定する。位置決定の際のシミュレーションでは電波発信点の出力強度は -10 dBm としている。

4.2 Wi-Fi 電波強度地図の精度

電波強度地図の生成手法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 AP5 までの 5 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 の設置箇所とビーコン観測地点を図 2 に示す。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。

これに対し、まず観測データを用いて当該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。AP はすべて建物の窓際に設置し、設置した箇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渡ったため、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 14.2 m であり、誤差最小のケースは AP3 の 3.4 m、誤差最大のケースは AP5 の 22.5 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、5 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 AP5 の受信地点数はそれぞれ 5, 1, 8, 9, 7 であり、計 30 の観測が得られた。これらの観測について、図 3 に推定値と実測値の比較結果を示す。まず、AP5 の誤差が比較的大きいことが読み取れるが、これは AP5 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 30 の観測のうち、21 の観測において RSS の誤差が ± 5

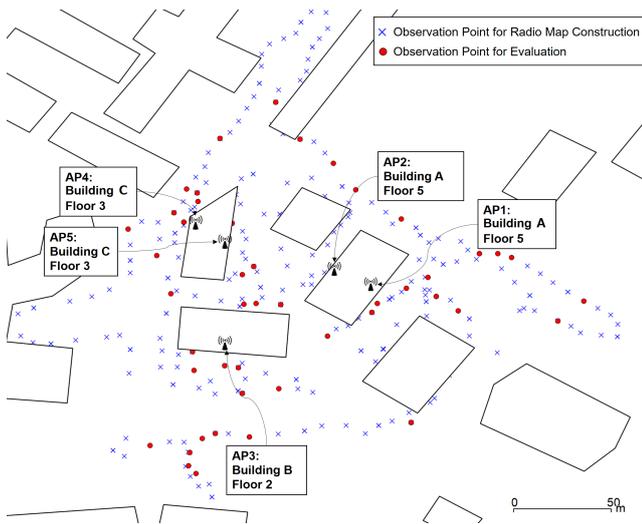


図 2 AP 設置箇所およびスマートフォンによるチャンネルスキャン地点

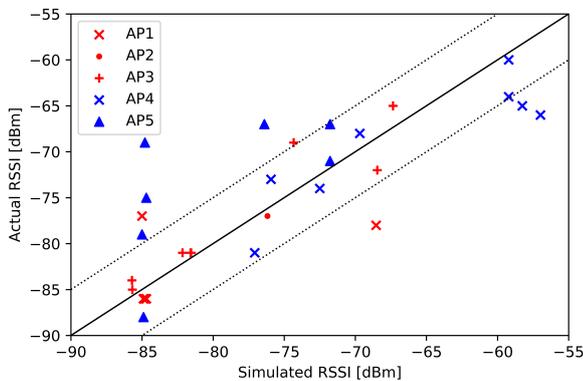


図 3 RSSI の推定値と実測値の比較

dBm 以内に収まっており、VR 空間上での Wi-Fi サービスの QoE の調査やスマートフォンアプリの検証、また新規 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、本推定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に伴い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更なる検証を実施していく計画である。

5. VR 上への都市環境の再現

VR 空間上に都市環境および Wi-Fi の電波伝搬環境を再現し、開発したスマートフォンアプリの画面表示とリアルタイム操作を VR 上で可能とする手法および実装方法について説明する。システムの詳細を図 4 に示す。都市環境を再現する VR アプリケーションは、Windows PC 上で動作する Unity アプリケーションとして実装し、3 節で述べたように、入力となる 3 次元都市モデルには Unity の Asset

Store から入手可能な「ZENRIN City Asset」を利用し、Wi-Fi の電波伝搬環境には Wi-Fi データベースから取得したデータを利用する。

5.1 VR 空間へのスマートフォンの統合

スマートフォンアプリを用いた Wi-Fi サービスの QoE の調査およびアプリケーションの通信部分の実装の性能や適応性の調査を VR 空間上での可能にするため、VR 空間へ現実環境のスマートフォンを統合する。VR 空間上へのスマートフォンの統合を行うための、VR 上でスマートフォンアプリの画面表示とリアルタイム操作を可能とする手法について説明する。まず端末の位置を VR 空間内へ反映させる方法について述べる。現実環境上で利用しているスマートフォンの位置のトラッキングし、仮想ユーザと仮想スマートフォンの位置関係を実ユーザと実スマートフォンの位置関係と同じにするため、図 5 に示すように VR コントローラにスマートフォンを固定する。実ユーザは実スマートフォンが固定されたコントローラを、スマートフォンを持つように保持する。VR 空間内での仮想スマートフォンのコントローラからの相対的な位置を、現実環境におけるスマートフォンからのコントローラの相対的な位置と同じに設定しておくことにより、仮想ユーザから見たスマートフォンの位置が実空間における実ユーザから見たスマートフォンの位置と同様になる。またアプリケーション開始時の仮想スマートフォンの向きと実スマートフォンの向きを、東西南北を基準とした方位で一致させておくことにより、スマートフォンの磁気センサによるコンパスも現実環境と同様に利用可能となる。

次に端末の画面を VR 上へ反映させる方法について述べる。まずスマートフォンから Windows PC へ USB 接続か Wi-Fi により画面を配信する。これは Android の場合、Miracast を利用するか、あるいは Vysor といった専用のソフトウェアを用いることで実現可能である。そして Windows PC 内に取り込んだ Android の画面を、Windows 上のプログラムでキャプチャし、ローカルホスト内部でストリーミング配信を行う。Unity 上の VR アプリケーション内にブラウザを用意し、配信されているストリーミングをブラウザ上での Web アプリケーションで受信することにより Unity 上で Android の画面を表示することができる。

以上のように実スマートフォンの実ユーザ視点の相対位置と画面を VR 空間上の仮想スマートフォンへ反映させることにより、VR アプリケーション内においてもスマートフォンをリアルタイムに操作し、スマートフォンアプリの実験や検証を行うことが可能となる。

さらに、VR 空間でのスマートフォンアプリの利用環境をより現実に近いようにするため、VR 空間内での仮想スマートフォンの位置情報（緯度・経度）や Wi-Fi の電波伝搬環境を実スマートフォンと共有する。VR 空間内に再現した都

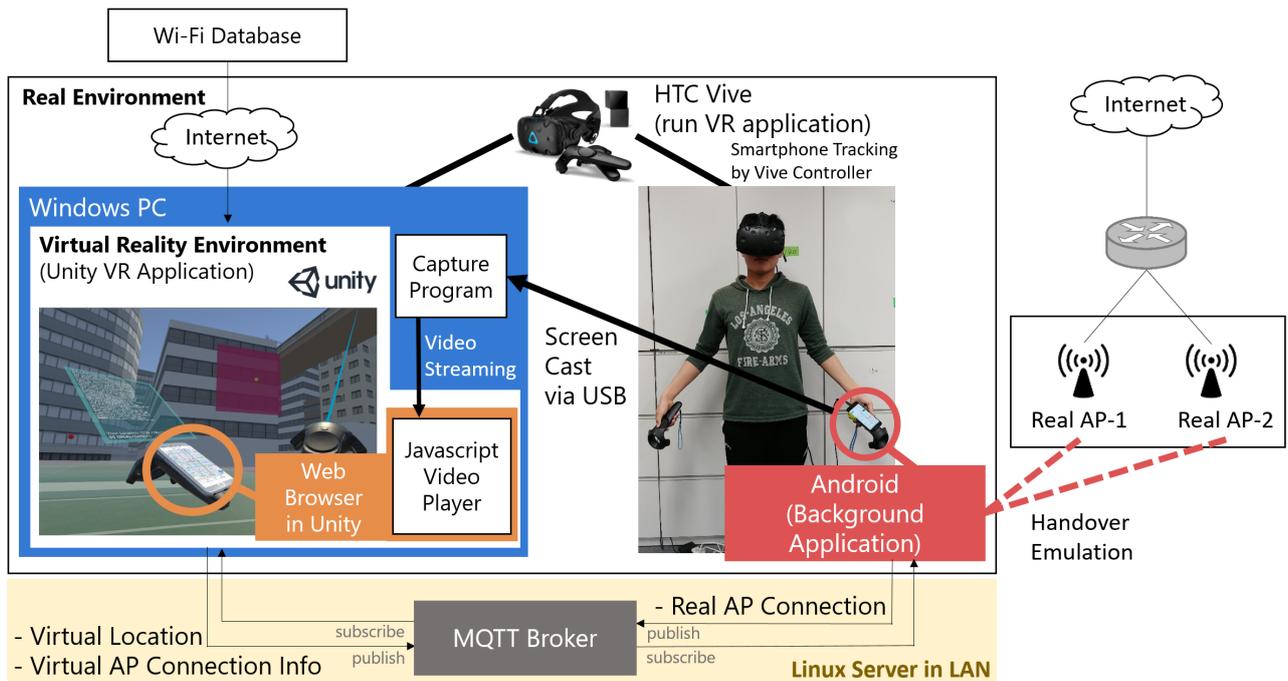


図 4 システムの実装



図 5 スマートフォンを VR コントローラに固定することにより端末をトラッキング

市空間での仮想ユーザのいる位置情報を緯度経度に変換し、仮想位置情報としてサーバへ送信する。実スマートフォン上では予めバックグラウンドアプリを動作させておく、このバックグラウンドアプリはサーバ上の仮想位置情報を取得し Android の疑似ロケーションの機能を利用して、仮想位置情報を実スマートフォンの現在位置情報として設定する。VR 空間内での位置情報や Wi-Fi 電波伝搬環境の変化をリアルタイムに検知するため、これらの情報のやり取りには MQTT プロトコルを利用する。位置情報と同様に Wi-Fi データベースと仮想位置情報から得られる、仮想スマートフォンが検出可能な AP の情報も実スマートフォンへ共有する。以上の仮想スマートフォンと実スマートフォンの情報共有システムにより、地図アプリなど現在位置情報を利用するアプリケーションを VR 空間内で利用することが可能となる。

5.2 仮想ユーザの移動

VR 空間内における仮想ユーザの移動方法について述べる。一般的な VR アプリケーションでは、仮想ユーザの移動を実ユーザが入力する方式として、専用のコントローラやキーボードの方向キーを利用する方式や、トラッキングされているコントローラで仮想空間内で行きたい場所をレーザーポインタで指定する方式が用いられることが多い。これらの方式ではユーザは基本的に指を動かすだけで VR 空間内を移動できる。これは、実空間における歩行の動きとは大きく異なるため、地図アプリや AR アプリ・ナビアプリなどの移動しながら利用することを想定したアプリケーションの QoE を VR 空間上で調査する際の、実際の体感品質と VR 空間内での体感品質の差の要因になる。

そこで本システムでは [25] で用いられている、両手に保持した VR コントローラのスイングを検知して仮想ユーザの移動を行うシステムを利用する。実ユーザは両手にトラッキングされている VR コントローラを保持した状態で、実際に歩行するように手を振ることで、VR 空間内で前方向に進むことができる。移動速度やスイング検知の閾値は [25] のものを用いた。

5.3 Wi-Fi ハンドオーバーの再現

現実の都市環境では複数の AP が混在する環境下でスマートフォンなどの Wi-Fi クライアントが移動すると、クライアントの接続する AP の切り替え (ハンドオーバー) が発生し、一時的な通信の切断が生じる。このハンドオーバーは Wi-Fi サービスの QoE の調査を行う上で重要な要素となる。そこで、提案手法による R 空間上でも同様の AP ハ



図 6 秋葉原 Wi-Fi スキャン地点

ンドオーバを再現する。まず VR 空間内での仮想的な接続先 AP を Wi-Fi データベース上の電波強度地図に基づいて決定する。VR アプリケーション起動時に、仮想スマートフォンは電波強度地図から算出される仮想スマートフォンの位置で観測される最も RSSI の高い Wi-Fi AP に接続するものとし、仮想スマートフォンの移動により接続中の AP の RSSI が -90 dBm を下回った際に、再度その位置で最も RSSI の高い AP へ接続するようにした。この仮想的な接続先の AP の情報を利用して、実スマートフォンのアプリケーションが実際に通信を行う AP の決定を行う。実際に通信を行う AP として Real AP-1 と Real AP-2 の 2 基を用意しておき、VR アプリケーションの開始時には実スマートフォンどちらかの AP に接続する。そして VR 空間上での仮想的な接続先 AP が切り替わった際に、もう一方の AP に接続を切り替えることにより、ハンドオーバによる通信切断を再現する。

6. 実験と評価

実験を行うため提案手法により VR 空間上に秋葉原の都市環境を再現した。再現するにあたりまず東京都秋葉原の Wi-Fi データベースの構築を行った。2018 年 3 月 13 日から 14 日にかけて秋葉原の 2,737 地点で Wi-Fi AP からのビーコン観測データを収集した。観測には LG Nexus 5 を利用した。観測した地点を図 6 に示す。収集したデータから Wi-Fi データベースを構築した。また以降の秋葉原の環境の再現についての実験ではスマートフォンとして LG Nexus 5X を、Wi-Fi AP として Apple AirMac Extreme 802.11n を利用した。

6.1 VR 環境上でのアプリケーションのテスト

構築した VR 空間内の秋葉原において Wi-Fi AP のハンドオーバが頻繁におきる環境下での、スマートフォンアプリケーションの体感品質を検証する実験を行った (図 7)。VR 空間上の秋葉原において、公衆 Wi-Fi を利用して

表 2 Wi-Fi ハンドオーバが頻発する環境下での動画再生

利用する AP の周波数帯	ハンドオーバ回数	動画停止回数
2.4GHz 帯	2	6
5GHz 帯	4	4
2.4GHz 帯と 5GHz 帯	2	7

Andoird の Youtube アプリを利用し動画を視聴しながら、秋葉原駅中央改札口から秋葉原書泉ブックタワーまでの約 200 m の道のりを歩いていく場合のアプリの体感品質を調査した。今回の実験では、秋葉原の観測データの中で、同一 SSID の AP の数が 25 箇所以上存在する SSID を公衆 Wi-Fi の SSID であると仮定し、その SSID を持つ AP のみを接続する AP の対象とした。ヘビートラフィック環境を再現するため、図 4 における Real AP-1 と Real AP-2 の両方にそれぞれ 4 台の PC を接続し、各 PC において Youtube の 4k 動画を同時に再生した。スマートフォンで再生する動画の画質は 720p とした。

仮想スマートフォンが接続する AP の選択方式として 5GHz 帯の AP を利用する方式と 2.4GHz 帯の AP を利用する方式、両方の周波数帯を利用する方式の 3 種類で比較を行った。Real AP-1 と AP-2 の出力周波数帯を変えることで実際に通信を行う周波数帯もその方式に合わせたものに変更した。ただし、実環境の AP を 2 基しか用意できなかったため、両方の周波数帯を利用する実験の際には、それぞれの AP に異なる周波数帯を割り当てた。このとき、仮想空間上でのハンドオーバは、接続する実際の AP を切り替えるのではなく、接続中の AP と切断したのち再接続することで再現した。

Youtube などの動画アプリケーションでは、ストリーミングの途切れがユーザの体感品質を損なうため、動画の停止回数を測定した。結果を表 2 に示す。2.4GHz 帯を利用する場合は 3 つの AP を利用し、2 回のハンドオーバが生じた。両方の周波数帯を利用する場合はいずれのタイミングでも 2.4GHz 帯の AP を利用したため、ハンドオーバの回数が 2.4GHz 帯のみを利用する場合と同様になった。5GHz 帯を利用する場合は 5 つの AP を利用し、4 回のハンドオーバが生じた。5GHz 帯のほうが、電波の到達距離が短く直進性が高いため、通信可能な範囲が小さかったためである。一方で、動画の停止回数は 2.4GHz 帯を利用した場合に 6 回、5GHz 帯を利用した場合に 4 回であり、5GHz 帯を利用した場合のほうが少なかった。これは 5GHz 帯を利用した場合のほうがより高い通信速度が得られたため、十分にバッファリングでき、ハンドオーバによる通信切断中であっても動画を再生し続けることができたためである。また体感でも、5GHz 帯を利用するほうがより快適にアプリを利用することができた。



(a) 実環境



(b) VR 環境

図 7 実験時の様子

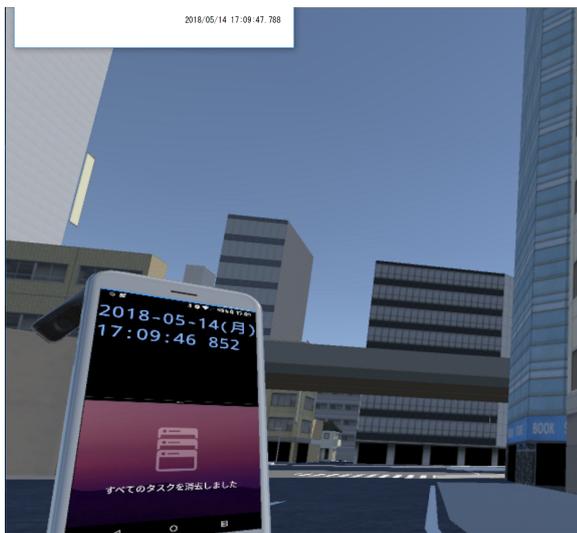


図 8 画面表示遅延の測定

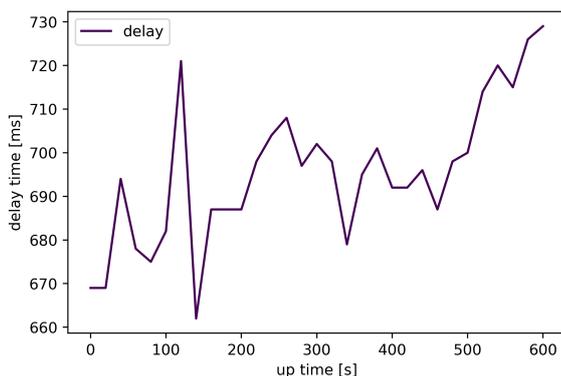


図 9 VR アプリケーションの起動時間に対する画面表示の遅延時間

6.2 スマートフォンのリアルタイム操作の性能評価

再現した都市環境における、スマートフォンアプリの画面表示とリアルタイム操作に関して性能評価を行った。スマートフォンへの入力については、ユーザは VR 内の画面を見ながら、実際のスマートフォンの画面をタッチ操作するため、VR アプリケーションを介することにより生じる

遅延はない。一方で、実スマートフォンに表示される画面が仮想スマートフォン上へ表示されるまでには遅延が存在する。この遅延時間が大きいと、体感する現実環境におけるアプリの操作感覚と VR 環境における操作感覚のずれが大きくなる。

VR 空間上へのスマートフォンアプリの画面表示について、表示の遅延時間を調べた (図 8)。スマートフォンと VR アプリケーションを動作させる Windows PC の時刻を同期させたうえで、スマートフォンのアプリ画面上にスマートフォン上でのミリ秒単位の時刻を表示し、その画面が VR 空間上に表示されるまでの遅延時間を 20 秒間隔で 10 分間計測した。VR アプリケーションの起動後からの時間に対する、表示の遅延時間を図 9 に示す。平均遅延時間は 695.5 ms、最大遅延時間は 729.0 ms であった。またアプリケーションの起動時間が長くなればなるほど画面の表示遅延が大きくなる傾向にあるが、ユーザが VR 空間上でスマートフォンを利用していないタイミングで画面の配信をリセットすることで、この遅延の増加を抑えることが可能である。

7. おわりに

本研究では、Wi-Fi データベースと、ゼンリン社が提供する 3 次元都市モデルを用いて VR 空間上に都市環境および Wi-Fi の電波伝搬環境を再現し、VR 上では、開発したスマートフォンアプリの画面表示とリアルタイム操作を可能とするシステムを構築した。これらにより、複数の公衆 Wi-Fi サービスが混在する環境においてユーザーの現実環境の振る舞いに応じたアプリケーション QoE を VR 空間上で調査可能とする手法を提案した。

本システムを用いて秋葉原の環境を VR 上に構築し、Wi-Fi のハンドオーバが頻発する環境下での動画アプリの品質の検証を行った。実験を行った経路上では、5GHz 帯の AP を利用したほうが、2.4GHz 帯の AP を利用した場合よりもハンドオーバの回数が 2 倍程度増える一方で、動

画の停止回数が減り、体感の品質が向上することが確かめられた。このように、本システムを利用することによって、都市の任意の地点における Wi-Fi サービスの QoE の調査を、天候や交通状況といった環境要因に左右されることなく、また実地へ赴かずに行うことが可能になることを示した。

今後の課題として、現実環境でのアプリケーションの体感品質と仮想空間でのアプリケーションの体感品質の差を多様な数多くの被験者へのアンケートをから調査し、本システムによる再現度について評価することがあげられる。また Wi-Fi の通信の再現では、今回は単純なハンドオーバーの再現にとどまっており、再現した VR 空間上では、すべての AP のトラフィックが同様であり、また本来はユーザの移動により変化する RSSI も一定であるなど、現実環境とは差異の大きい部分もある。今後はネットワークシミュレータ Scenargie と連携することで、より現実に近い通信環境を再現することを検討している。

参考文献

- [1] Kajita, S., Amano, T., Yamaguchi, H., Higashino, T. and Takai, M.: Wi-Fi Channel Selection Based on Urban Interference Measurement, *Proc. of 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQoS 2016)*, pp. 143–150 (2016).
- [2] Wi-Fi Alliance: Wi-Fi Vantage. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-vantage>.
- [3] 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).
- [4] Wi-Fi database - wifibigdata.org: available from <http://www.wifibigdata.org> (Accessed: 2017/5/9).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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, IEEE, pp. 675–684 (2005).
- [8] 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)*, IEEE, pp. 749–757 (2007).
- [9] Ahmed, N., Keshav, S. and Papagiannaki, K.: OmniVoice: A Mobile Voice Solution for Small-scale Enterprises, *Proc. ACM 12th International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2011)*, ACM, p. 5 (2011).
- [10] Lv, P., Wang, X., Xue, X. and Xu, M.: SWIMMING: Seamless and Efficient WiFi-Based Internet Access from Moving Vehicles, *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol. 14, No. 5, pp. 1085–1097 (2015).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., Hightower, J. et al.: Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild, *Pervasive computing*, Vol. 3468, Springer, pp. 116–133 (2005).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] WiGLE - Wireless Network Mapping: available from <https://wigo.net> (Accessed : 2017/5/9).
- [21] Salman, H. M., Ahmad, W. F. W. and Sulaiman, S.: Usability Evaluation of the Smartphone User Interface in Supporting Elderly Users From Experts' Perspective, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 22578–22591 (2018).
- [22] Zhang, T., Zhao, S., Cheng, B., Ren, B. and Chen, J.: FEP: High Fidelity Experiment Platform for Mobile Networks, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 3858–3871 (2018).
- [23] Gao, J., Bai, X., Tsai, W. T. and Uehara, T.: Mobile Application Testing: A Tutorial, *Computer*, Vol. 47, No. 2, pp. 46–55 (2014).
- [24] Lyons, K.: 2D Input for Virtual Reality Enclosures with Magnetic Field Sensing, *Proc. of 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2016)*, pp. 176–183 (2016).
- [25] Narimoto, R., Kajita, S., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: 認知マップの誤りによる迷い行動のスマートフォンを用いた検出手法マルチメディア, 分散, 協調とモバイル

- (DICOMO 2017) シンポジウム pp. 1386–1395 (2017).
- [26] Shimada, K., Hiroi, K., Kaji, K. and Kawaguchi, N.: 仮想空間システムを用いた空間認識能力計測手法の提案マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2016) シンポジウム pp. 789–797 (2016).