

推薦論文

VRを用いたWi-Fi過密環境における スマートフォンアプリ検証手法

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}

受付日 2019年5月4日, 採録日 2019年11月7日

概要: 我々の研究グループではクラウドソーシングと電波伝搬シミュレーションの併用により 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。これらの情報は実際の街区における Wi-Fi 通信環境の再現などに有用であるが、たとえばユーザの移動にともな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 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舞いに応じたアプリ 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。

キーワード: Wi-Fi 過密環境, 都市環境, Virtual Reality, スマートフォンアプリ検証

A VR-based Platform for Testing Smartphone Applications in Congested Wi-Fi Environment

TATSUYA AMANO^{1,a)} SHUGO KAJITA¹ HIROZUMI YAMAGUCHI¹ TERUO HIGASHINO¹ MINEO TAKAI^{1,2}

Received: May 4, 2019, Accepted: November 7, 2019

Abstract: We design and develop an architecture to test mobile app in VR space. The system allows developers to use a real smartphone in VR and to test and evaluate their apps at the interested locations, with various network environment. The system builds and reproduces the real world environment of 3D space and real networks in the VR environment, using the existing 3D city models and our original Wi-Fi database, which has been open for public and has collected more than 70K Wi-Fi RSSI samples at different cities. These data have been used to estimate the 3D locations of Wi-Fi APs, which are useful to interpolate RSSI samples using highly-reliable ray-trace simulation. Then our system enables to real-time integrate the screen of the VR user's smartphone in the VR space. The user can operate the app via the VR view, and test the usability and performance of the app in such an emulated environment.

Keywords: Wi-Fi dense environment, urban area, virtual reality, smartphone application testing

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

本論文の内容は 2018 年 7 月のマルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2018) シンポジウムにて報告され, モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

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

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

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、今後はた
と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
を生成してやりと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。たと
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
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いる [3]。東京都秋葉原と
大阪市内のそれぞれ約 0.5 km² および約 5 km² 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、被験者を用いてスマートフォンアプリの体感品質を



図 1 VR 空間内でのスマートフォンアプリ検証
Fig. 1 Testing a smartphone application in VR.

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 [5] 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、図 1 のよう
に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。さらに、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 (Augmented
Reality) など場所依存アプリの開発者は、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も行うことができる。

秋葉原の都市環境を VR 空間上に再現し、ハンドオーバ
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 5 GHz 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。文献 [6] 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られている。文献 [7] 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ネル選択アルゴリズムとクライアントの AP 選択方法が述べられている。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。

このような問題に対して、AP、クライアント、モバイルルータすべてがチャ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を構築し活用する研究もなされている。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 [8], [9], [10]。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は、文献 [11] の調査が詳しい。Place Lab [8] 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 [12]。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。

アプリに対して現実の通信環境を再現し提供する方法としてエミュレーションとシミュレーションの2つのアプローチが存在し、特にネットワークエミュレーションはスマートフォンアプリなどのモバイルアプリケーションのテストを行う際に幅広く利用されている。たとえば文献 [13] ではネットワークエミュレーションのためのプラットフォームである Slice-Time が提案されている。Slice-Time では仮想マシン上で現実的なネットワーク環境を再現し、ソフトウェアのテストを可能にしている。Android デバイスをシミュレートされたネットワークに接続し Android アプリを含む分散システムを大規模ネットワーク上で評価可能なテ

ストベッド [14] も提案されている。これらのシステムは多様なネットワーク環境下でのアプリケーションの評価を可能にする一方で、ユーザの周辺の空間やユーザの振舞いを考慮できるものではない。

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や評価については、様々なドメインにおける手法が提案されてきている。アプリケーションのユーザビリティの評価は文献 [15], [16], [17] で述べられているようなヒューリスティックな手法を用いることが一般的である。文献 [18] 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が述べられている。文献 [19] 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が提案されている。またネットワークやサービスの評価指標として、客観的な指標に基づく QoS (Quality of Service) に対して、個々のユーザの主観に基づく QoE が注目されている。ITU-T による定義 [20] では QoE は「アプリケーションやサービスに対するユーザの喜び・不快感の程度」であるとされており、アプリケーション・サービス自体の特性に加えて、ユーザの期待や文化的背景・感情といったコンテキストの影響も受けるものとされている。文献 [21] では無線環境下におけるアプリケーションやサービスの QoE について調査しており、ネットワーク、デバイス、メディア・コンテンツのそれぞれの観点からの一般的な QoE への影響要素が述べられている。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文献 [22] の調査が詳しく、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。しかし、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体感品質の調査を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フェースに関して様々な研究がなされている。文献 [23] 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、磁石による入力方式が提案されている。また VR 空間上に都市環境を再現し、その VR 空間上で検証や実験を行う取り組みもなされている。文献 [24] ではスマートフォンセンサを用いた迷い行動の検出手法が提案されているが、その検証のために VR 空間上に構築された目的地発見ゲームを活用している。文献 [25] では VR 空間上に再現した都市環境を用いた、人の空間認識能力の調査について述べられている。Empath-D [26] は VR 空間上にスマートフォンアプリの画面を表示することで、視覚障害者向けのモバイルアプリケーションのアクセシビリティの検証を行うシステムである。Empath-D では実際に利用が想定されるような現実環境の視覚情報を VR 上に再現し、ユーザに提供

している。しかし、スマートフォンアプリはエミュレータ上で実行されている画面を VR 上へ投影しているのみである。本研究では、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、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 2 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 の電波強度地図である。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、我々がすでに構築している 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。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スマートフォンアプリは、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 AP

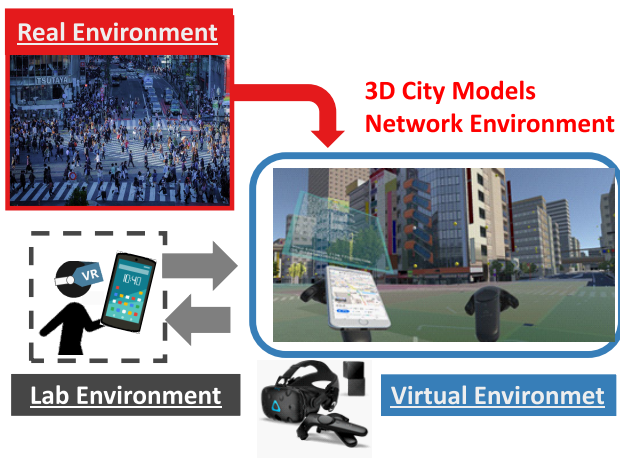


図 2 システム概要
Fig. 2 System overview.

位置を推定し、電波強度地図の生成を行い、それらを 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 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 が存在すると見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 環境の再現・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 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。

提案システムでは、図 3 のように実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。この実空間と 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よび、同様に実空間において 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よぶ。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、

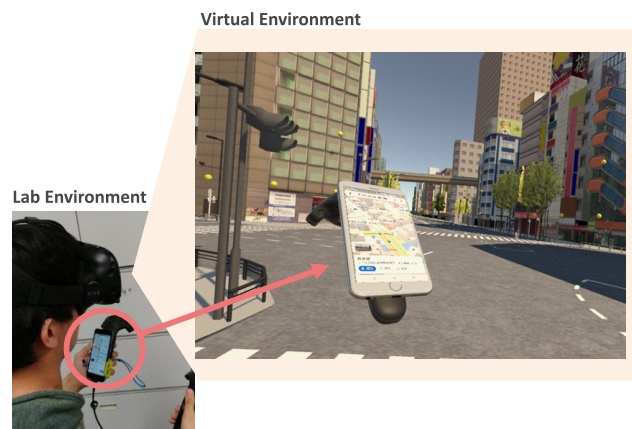


図 3 VR 空間へのスマートフォンの反映
Fig. 3 User's smartphone in VR space.

その情報に基づいて Wi-Fi の接続切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。

4. Wi-Fi データベース

4.1 Wi-Fi データベースの構築手法

提案システムでは我々がすでに構築している Wi-Fi データベースの構築手法 [3] 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 データ収集スマートフォンアプリを利用する。このスマートフォンアプリはユーザの移動に合わせて自動的に一定の間隔でチャ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 RSSI, AP の ESSID および BSSID (MAC アドレス), 使用チャネル, 使用帯域幅 (20 MHz や 40 MHz 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。スマートフォンアプリ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 BSSID 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よ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に、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 10 m 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 $\bar{\bar{S}}$ 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。

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

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。

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

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。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。文献 [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 RSSI 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 RSSI 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

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

Table 1 Simulation parameters for transmission point localization.

Parameters	Values
Simulator	Scenargie
Propagation Module	Fast Urban Propagation Module
Path-loss 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

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。これは後述する出力強度の決定の際に、候補として用いられる出力強度のうち、出力強度が -10 dBm の場合に最適となる傾向が経験的に得られているためである。

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、実測の観測データとの RSSI 誤差の平均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。出力強度の決定の際には、-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する。

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保持して歩行し、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 4 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 14.2 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 RSSI を電波強度地図上の推定値と実測値で比較を行うことで、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

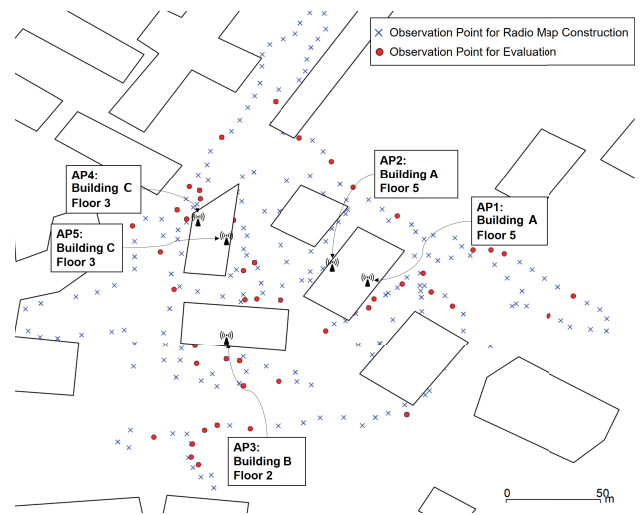


図 4 AP 設置個所およびスマートフォンによるチャンネルスキャン地点

Fig. 4 AP locations and observation points.

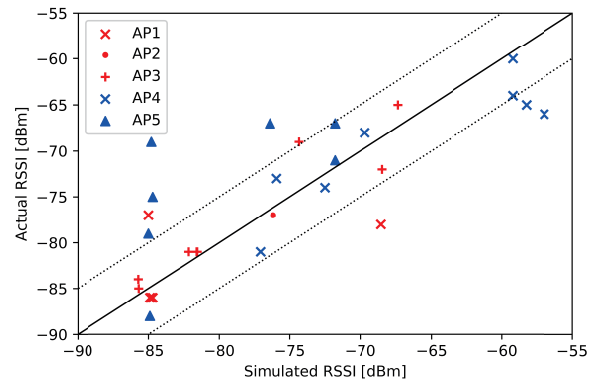


図 5 RSSI の推定値と実測値の比較

Fig. 5 RSSI estimation error.

観測が得られた。これらの観測について、図 5 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 RSSI の誤差が ± 5 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ともな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さら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

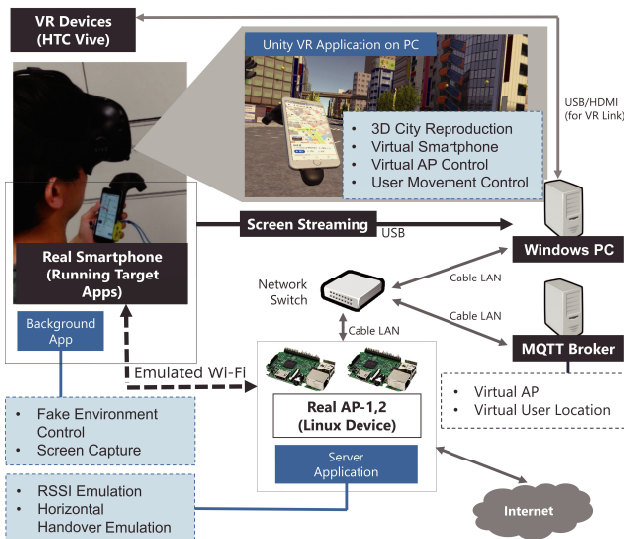


図 6 システムの実装

Fig. 6 System implementation.

現し、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 空間上で可能とする手法および実装方法について説明する。システム実装の詳細を図 6 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する。3 章で述べたように、入力となる 3 次元都市モデルには Unity の Asset Store から取得可能な「ZENRIN City Asset」(図 8) を利用し、Wi-Fi の電波伝搬環境には Wi-Fi データベースから得られる電波発信点位置と電波強度地図を利用する。

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 空間上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 7 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。実ユーザは実際にスマートフォンを持つようにして、実スマートフォンが固定されたコントローラを保持する。VR 空間上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



図 7 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

Fig. 7 A smartphone fixed onto the VR controller and tracked in VR environment.

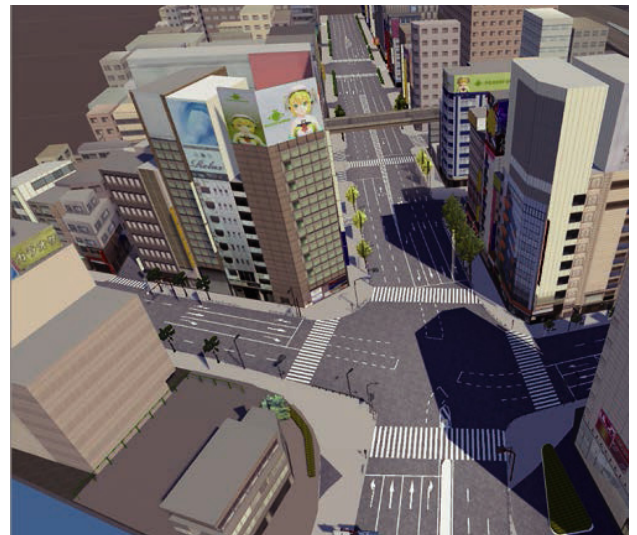


図 8 3次元都市モデル

Fig. 8 3D city models.

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。まず実スマートフォンから Windows PC へ USB 接続により画面を配信する。実スマートフォン上で動作する Android のバックグラウンドアプリにおいて、Android の Media Projection API により端末の画面を取得し、リアルタイムにエンコーディングを行いながら、USB を介して Windows PC 上へ取得した端末画面をストリーミング配信する。Windows PC 上で USB 経由で送られるデータのデコーディングを行い、Windows PC 画面上に実スマートフォンの画面を表示する。さらに Windows の Desktop Duplication API によって Windows 画面から実スマートフォンの画面を切り抜き Unity アプリケーション上に取り

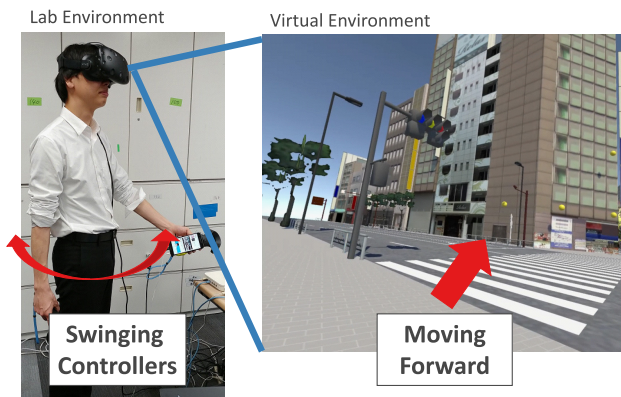


図 9 コントローラのスウィングによる VR 内での移動

Fig. 9 Moving forward by swinging controllers.

込む。そして VR 空間上の仮想スマートフォンの位置に表示することで、VR 空間上に実スマートフォンで動作するアプリの画面を表示することを実現する。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づけるため、VR 空間上での仮想スマートフォンの位置情報（緯度・経度）を実スマートフォンに反映させる。VR 空間上に再現した都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動作するバックグラウンドアプリがサーバから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 空間上での位置情報の変化をリアルタイムに検知するため、位置情報のやりとりには MQTT プロトコルを利用する。以上の仮想スマートフォンから実スマートフォンへの位置情報の共有により、地図アプリなど現在位置情報を利用するスマートフォンアプリを VR 空間上で利用することが可能となる。

5.2 仮想ユーザの移動

VR 空間上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上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 空間上を移動できるが、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 空間上での体感品質の差の要因になる。

そこで本システムでは文献 [24] で述べられている、両手に保持した VR コントローラのスウィ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 (図 9)。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 空間上で前方向に進むことができる。

5.3 VR 空間上への Wi-Fi 環境の再現

システムは Wi-Fi データベースをもとに VR 空間上に Wi-Fi 環境の再現を行う。文献 [21] では、アプリケーション QoE に影響を与える無線環境上の要素として以下の 7 つの要素が重要であると述べられている。

- (i) 無線チャンネル上の物理現象 (環境ノイズ・フェージング・干渉)
- (ii) 無線チャンネルの信頼性 (傍受防止などセキュリティ上の問題)
- (iii) キャパシティ (カバレッジ・帯域幅など)
- (iv) 無線チャンネルの共有状況 (ユーザの数など)
- (v) RSSI
- (vi) トラフィック負荷
- (vii) ハンドオーバ

したがって、本研究の目的である Wi-Fi 環境下での QoE 測定のためには、各 AP について、想定されるスマートフォンアプリの利用時刻およびユーザの位置ごとに現実環境上でのこれらの要素の状態を取得あるいは推定したうえで、それらを VR 空間上で再現する必要がある。

これら QoE に影響を及ぼす要素のうち、(iii) キャパシティのうちのカバレッジと (v) RSSI、(vii) ハンドオーバは時刻による要素の状態の変化が比較的小さく、ユーザの位置による影響を強く受ける。ユーザの位置に応じた RSSI やハンドオーバの発生の有無は、各 AP の電波強度地図を用いることで得ることができるため、Wi-Fi データベースを活用することで、これらの要素を VR 空間上へ再現することが可能である。最初に Wi-Fi データベースを用いて実際の都市環境上でのこれらの要素を、VR 上でのユーザの位置に応じて動的に再現する方法について述べる。

まず VR 空間上での仮想的な接続中の AP (Virtual 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。Virtual AP は、現実の都市環境において、その位置にいた場合にクライアントが接続すると考える AP である。電波強度地図から得られる仮想スマートフォンの位置における最も RSSI の高い AP を Virtual AP として決定し、仮想スマートフォンはその AP に接続しているものとする。このとき Virtual AP のその位置における RSSI を V_r とする。仮想スマートフォンの移動により V_r が一定の閾値を下回った際に、水平ハンドオーバが生じたと思われ、再度

その位置で最も RSSI の高い AP を Virtual AP として決定する。本研究においては利用する Android 端末において実際に AP 切替えが生じる閾値を測定し、その値 (-90 dBm) を閾値として用いた。

この Virtual AP を利用して、RSSI とハンドオーバーのエミュレーションを行う。移動にともない変動する V_r に合わせて、実スマートフォンが実際に通信を行う現実環境の AP (Real AP) の出力強度を変動させることによって RSSI のエミュレーションを行う。Real AP の実スマートフォンにおける RSSI を R_r とし、Real AP から実スマートフォンまでの電波減衰を L とする。あらかじめ Real AP の出力強度 T_r を一定し、そのときの R_r を測定することで L を $L = T_r - R_r$ により決定しておく。VR 空間上で仮想スマートフォンの仮想位置情報が変化した場合に T_r を、 $T_r = V_r + L$ により決定する値に変化させ R_r を V_r に近づけることで、都市環境にいる場合と同等の RSSI を再現する。Real AP として、Linux デバイスを Hostapd [27] によりソフトウェアアクセスポイントとしたものを利用することで、動的な出力強度の変更を可能にした。

また Virtual AP の変化に応じて、Real AP の切替えを行うことによってハンドオーバーのエミュレーションを実現する。Real 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 Virtual AP が切り替わった際に、もう一方の Real AP に接続を切り替えることにより、ハンドオーバーによる通信切断を再現する。VR アプリケーションから実スマートフォンへの仮想位置情報の共有と同様に、 V_r や Virtual AP の切替え発生のタイミングを VR アプリケーションから AP である Linux デバイスへ共有する際には MQTT を利用する。

以上のようにしてネットワークに関連する QoE への影響要素である (iii) キャパシティのうちのカバレッジと (v) RSSI, (vii) ハンドオーバーを現実と同様に VR 空間上へ再現する。次にその他の QoE に影響を及ぼす無線環境上の要素について、その再現方法を述べる。

(iii) キャパシティは、AP の処理能力の限界や利用する無線規格によって決定される AP 固有の値であり、時刻やユーザの位置の影響を受けない要素である。また (iv) 無線チャンネルの共有状況や (vi) トラフィック負荷は AP ごとに異なる特性を示しユーザの位置の影響は受けないが、時刻により大きく変化する。これらの要素については QoE 計測の対象とするスマートフォンアプリの想定する時刻や環境での実測値に従って、Real AP の設定や環境を動的に変更することにより、VR 空間上へ反映することが可能である。たとえば、無線チャンネルの共有状況については、現実環境での AP ごとのユーザ数に応じて Real AP に接続する実スマートフォン以外の機器の数を変更する。さらに

トラフィック負荷については、現実環境でのトラフィック負荷と同様になるように、実スマートフォン以外の機器が AP を介して負荷のかかる通信を行う。なお現実環境のすべての AP について、これらの要素の状態を測定することは対象 AP の数が膨大であるため容易ではない。そこで、公衆 Wi-Fi やオフィス Wi-Fi といった SSID や電波発信点の位置を基に判別できる AP の種別および時間帯ごとに複数の Real AP の設定を用意し、それを切り替えることで実現する。

(ii) 無線チャンネルの信頼性については、現実環境において実運用されている AP が傍受されているかどうかといったセキュリティ上のリスクであり、Real AP に対してセキュリティ上の問題を設定すれば VR 空間上でも再現可能である。無線チャンネルの信頼性については現実環境の状態を測定することは容易ではないが、今回のアプリケーション QoE の測定という目的に対しは、必ずしも現実と同様の環境を再現する必要はなく、通信が傍受されており無線チャンネルの信頼性が低いというような、想定されるセキュリティリスクの有無が QoE にどう影響するかを調べることができればよい。

最後に環境のノイズや電波の干渉などを含む (i) 無線チャンネル上の物理現象は現実環境の複数 AP・ユーザの位置・時間帯・周辺の交通や群衆といった環境の影響を複雑に受けるため、現実環境の状態をとらえることは困難であり、完全に同様の環境を VR 空間上に再現することは難しい。また VR 空間上へ再現するためには、実験環境外からの電波干渉の影響を除く必要がある。しかし、無線チャンネル上の物理現象が想定する現実環境と同様の場所でラボ環境を構築することにより、およその環境の再現が可能である。

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 10 に示す。

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 AP のハンドオーバーが頻繁におきる環境下での、スマートフォンアプリの体感品質を検証する実験を行った (図 11)。

VR 空間上の秋葉原において、公衆 Wi-Fi を利用して Android の YouTube アプリを利用し動画をストリーミングで視聴しながら、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 200m 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



(a) 実環境



(b) VR 環境

図 11 実験時の様子

Fig. 11 Experiments.

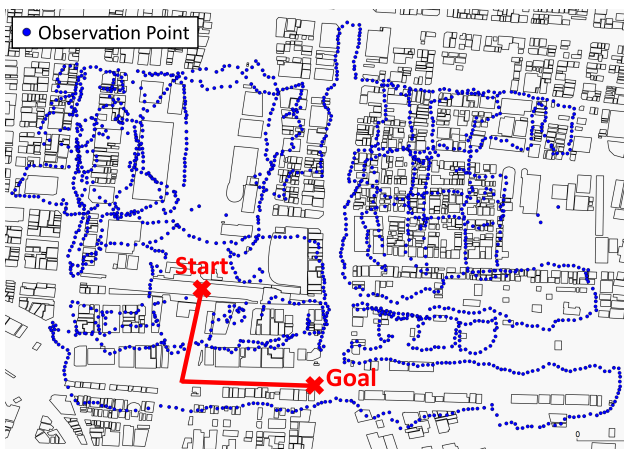


図 10 秋葉原 Wi-Fi スキャン地点

Fig. 10 Observation points in Akihabara.

観測データの中で、同一 SSID の AP の数が 25 カ所以上存在する 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、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 画質の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 Real 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。

Youtube などの動画アプリでは、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、移動中に実スマートフォンは 3 つの AP を利用し、2 回のハンドオーバーが生じた。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

表 2 Wi-Fi ハンドオーバーが頻発する環境下での動画再生

Table 2 Video playback in frequent Wi-Fi handover environment.

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

ため、ハンドオーバーの回数が 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 回のハンドオーバーが生じた。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、ハンドオーバー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。

以上の結果が得られた原因は、実験環境における実験外の 2.4GHz 帯の AP による干渉が多いためであるが、今回の実験環境では 2.4GHz 帯の AP が 20 基、5GHz 帯の AP が 22 基観測されており、VR 空間上で初期位置とした現実の秋葉原の地点では 2.4GHz 帯の AP が 24 基、5GHz 帯の 42 基観測されており、今回の実験では周囲の 2.4GHz 帯の AP 密度は同様であると見なしている。

6.2 システムによる QoE 評価への影響

本システムによる VR 空間自体が QoE への影響を及ぼす場合、本システムを用いて正確にスマートフォンアプリの検証を行うことができないため、現実環境と再現された VR 空間での QoE への影響要素の差異を評価する。文献 [21] では QoE への影響要素をネットワーク、デバイス、メディア・コンテンツの 3 つのカテゴリに分類しており、

このうちネットワークの再現の特性については5章で述べたとおりである。

文献 [21] で述べられている QoE への影響要素のうち、デバイスのカテゴリには、アンテナ性能、バッテリー性能・寿命、計算能力・資源 (CPU やストレージ・メモリ)、スクリーン・キーボードサイズ、端末上のトラフィック負荷の5つの要素が分類されている。本システムでは実スマートフォンがデバイスに相当し、上記の5つの要素のうち、アンテナ性能、スクリーン・キーボードについては機種により決定されるものであり、実スマートフォン端末を現実環境で使用する場合と VR 空間上で使用する場合と同様である。一方で、バッテリー性能・寿命と計算能力・資源および端末上のトラフィック負荷は実スマートフォン上で動作するバックグラウンドアプリの影響を受けるためその影響を評価した。スマートフォン上のアプリで約2分間の動画をストリーミング再生した場合のスマートフォン全体での平均 CPU 使用率、メモリ使用量を現実環境と VR 空間上で比較した。測定には Android Debug Bridge (ADB) の `dumpsys` コマンドを利用し測定した。また同様に5分間の動画をストリーミング再生した場合のバッテリー消費量と Wi-Fi の通信量を比較した。このときバッテリー消費量を調査するため、ADB の機能により USB 経由の給電がない状態をエミュレートし測定した。評価環境を表 3 に、評価結果を表 4 に示す。評価結果は5回の試行の平均値を示している。平均 CPU 使用率はバックグラウンドアプリの影響により10ポイント程度上昇し、平均メモリ使用量は40MB程度上昇した。アプリ別では平均 CPU 使用率、平均メモリ使用量は動画アプリではそれぞれ33.3%、220MBであり、バックグラウンドアプリではそれぞれ9.3%、80MBであった。システム全体の CPU やメモリのキャパシティからするとバックグラウンドアプリの影響は小さく、また実スマートフォンとしてより性能の高い端末を利用することでこの影響はより小さくすることが可能である。5分間のバッテリー消費量はバックグラウンドアプリの影響により平均1.1mAh増加したが、計測に使用した端末のバッテリー容量は2,700mAhであり、スマートフォン全体から見ると影響は軽微である。また通信量もやや増加しているが、端末全体の通信量から見ると影響は小さい。したがって提案システムを用いることによる、これらの QoE へ影響を及ぼす要素の変化は小さく本システムによる QoE 評価には大きな影響を与えない。

文献 [21] では、デバイス上で動作するアプリケーションの自体の QoE への影響要素をメディア・コンテンツのカテゴリとして分類している。このカテゴリには、様々なデバイス・利用状況への適応能力、モバイルデバイスでのユーザビリティ、デバイス消費電力の調整能力、データアクセス、オフラインでの利用可能性、バックエンドシステムとの透過的な同期、セキュリティ、アドオンの過不足といっ

表 3 評価環境

Table 3 Hardware used in the experiment.

VR Device	HTC Vive
PC RAM	16 GB
PC CPU	Intel Xeon CPU E5-1607 v4@3.10 GHz
PC GPU	NVIDIA Quadro M2000
Smartphone	Nexus 5X

表 4 現実環境と VR 空間上での端末リソースの差異

Table 4 Differences in resources consumption between the real environment and VR space.

	Real Environment	VR Environment
CPU Usage	53%	61%
Memory Usage	1815 MB	1853 MB
Battery Consumption	34.1 mAh	35.2 mAh
Wi-Fi Traffic (received)	22.15 MB	22.89 MB
Wi-Fi Traffic (sent)	813.37 KB	923.63 KB

た要素が含まれている。モバイルデバイスでのユーザビリティ以外の要素は、実スマートフォンのアプリケーションの処理によるものであり、ネットワークとデバイスのカテゴリに分類される他の要素と相互に影響するが、直接的に VR 空間の影響を受けるものではない。

しかし、モバイルデバイスのユーザビリティについてはデバイスとユーザのインタラクションに関する要素であり、提案システムによる VR 空間上での仮想ユーザによる仮想スマートフォンのユーザビリティの影響を強く受ける。そこで、再現された VR 空間上での、仮想ユーザによる仮想スマートフォンの操作性に関して実験・評価を行った。評価環境は表 3 に示すとおりである。デバイスとユーザのインタラクションに関して、ユーザから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、実際の現実環境のスマートフォンの画面をタッチ操作するため、提案システム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 VR 空間内の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。

そこで 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 12)。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 13 に示す。平均遅延時間は695.5ms、最大遅延時間は729.0ms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

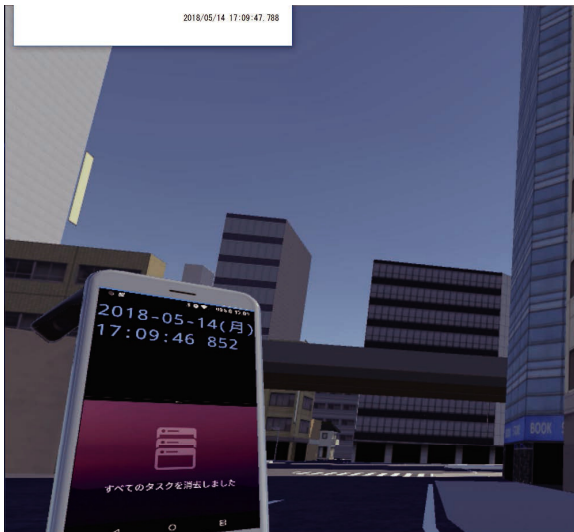


図 12 画面表示遅延の測定

Fig. 12 Measuring delay of the display.

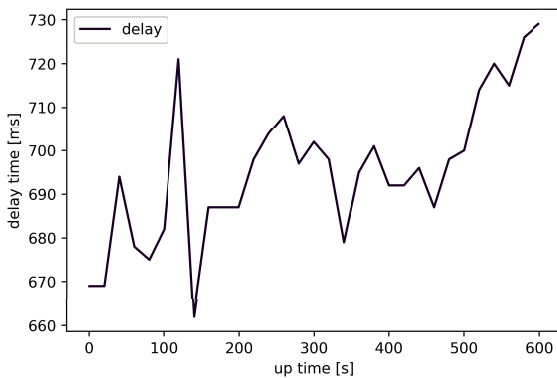


図 13 VR アプリケーションの起動時間に対する画面表示の遅延時間

Fig. 13 Screen delay time to VR application up time.

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の現実環境の振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 のハンドオーバー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。このシナリオにおいては、5 GHz 帯の AP を利用したほうが、2.4 GHz 帯の AP を利用した場

合よりもハンドオーバーの回数が 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。

また QoE への影響要素ごとに本システムにより再現された VR 空間上と現実環境での差異を調査し、特に提案システムによる影響が大きいと考えられる VR 空間上でのスマートフォンの操作性について評価を行い、ゲームアプリなどのリアルタイム性が求められるようなアプリではない、一般的なスマートフォンアプリでは、操作に影響のない遅延であることが確かめられ、本システムを用いることによる QoE への影響要素の変化が十分に小さいことを示した。

一方、今回の実験では QoE に影響する主要要素ごとに評価を行ったが、QoE はあくまでユーザの主観的な指標であり、ユーザの感情やアプリケーションに対する期待といったコンテキストの影響も受けるものであるため、今後の課題として、現実環境と VR 空間でのアプリケーション QoE の差を多様な被験者へのアンケートベースで調査し、本システムによる VR 空間の再現度および主観尺度へ影響について評価することがあげられる。

また今回の提案システムではネットワークに関する QoE への影響要素として、ユーザの位置や AP ごとにハンドオーバーと RSSI を再現しているが、AP に接続する他のユーザやトラフィック負荷などの他の要素については固定された値を設定しており、さらに無線チャネルの物理現象に関しては、実験を行う環境の状態がそのまま VR 空間の状態に反映される実装となっている。そこで今後はこれらの QoE に対する影響をより詳細に調査するとともに、本システムをネットワークシミュレータ Scenargie と連携し、シミュレーション上の通信路を構築することで、より現実近く多様な通信環境を再現可能と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. 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQutous 2016)*, pp.143-150 (2016).
- [2] Wi-Fi Alliance: Wi-Fi Vantage (2018-), available from (<https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-vantage>) (accessed 2019-04-19).
- [3] 天野辰哉, 梶田宗吾, 山口弘純, 東野輝夫, 高井峰生: 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] Amano, T.: 3D Urban Wi-Fi Database (2017-), available from (<https://www.wifibigdata.org>) (accessed 2019-04-19).
- [5] ZENRIN Co., LTD.: ZENRIN City Asset Series (2016-), available from (<https://www.zenrin.co.jp/contents/product/service/3d/asset/>) (accessed 2019-04-19).
- [6] Mhatre, V.P., Papagiannaki, K. and Baccelli, F.: Interference Mitigation Through Power Control in High Density 802.11 WLANs, *Proc. 26th IEEE Inter-*

- national Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp.535–543 (2007).
- [7] 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. 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp.1451–1459 (2007).
- [8] LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., Hightower, J., Smith, I., Scott, J., Sohn, T., Howard, J., Hughes, J., Potter, F., Tabert, J., Powledge, P., Borriello, G. and Schilit, B.: Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild, *Proc. 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2005)*, pp.116–133 (2005).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] Tsui, A.W.T., 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).
- [12] bobzilla, arkasha and uhtu: WiGLE: Wireless Network Mapping (2001-), available from (<https://wiggles.net/>) (accessed 2019-04-19).
- [13] Weingärtner, E., Schmidt, F., Lehn, H., Heer, T. and Wehrle, K.: SliceTime: A platform for scalable and accurate network emulation, *Proc. 8th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2011)*, pp.253–266 (2011).
- [14] Richerzhagen, B., Stingl, D., Rueckert, J. and Steinmetz, R.: Simonstrator: Simulation and Prototyping Platform for Distributed Mobile Applications, *Proc. 8th EAI International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTOOLS 2015)*, pp.99–108 (2015).
- [15] Inostroza, R., Rusu, C., Roncagliolo, S. and Rusu, V.: Usability Heuristics for Touchscreen-based Mobile Devices: Update, *Proc. 2013 Chilean Conference on Human-Computer Interaction*, No.2241, pp.24–29 (2013).
- [16] Yáñez Gómez, R., Cascado Caballero, D. and Sevillano, J.-L.: Heuristic Evaluation on Mobile Interfaces: A New Checklist, *The Scientific World Journal*, Vol.4, pp.1–23 (2014).
- [17] Inostroza, R., Rusu, C., Roncagliolo, S., Rusu, V. and Collazos, C.: Developing SMASH: A set of Smartphone’s uSability Heuristics, *Computer Standards & Interfaces*, Vol.43, pp.40–52 (2015).
- [18] Salman, H.M., Wan Ahmad, W.F. and Sulaiman, S.: Usability Evaluation of the Smartphone User Interface in Supporting Elderly Users From Experts’ Perspective, *IEEE Access*, Vol.6, pp.155–162 (2018).
- [19] Zhang, T., Zhao, S. and Cheng, B.O.: FEP: High Fidelity Experiment Platform for Mobile Networks, *IEEE Access*, Vol.6 (2018).
- [20] ITU-T Recommendation P.10/G.100: Vocabulary for performance, quality of service and quality of experience Amendment 1 (2019).
- [21] Baraković, S. and Skorin-Kapov, L.: Survey and challenges of qoe management issues in wireless networks, *Journal of Computer Networks and Communications*, Vol.2013, pp.1–28 (2013).
- [22] Gao, J., Bai, X., Tsai, W.-T. and Uehara, T.: Mobile Application Testing: A Tutorial, *IEEE Computer*, Vol.47, No.2, pp.46–55 (2014).
- [23] Lyons, K.: 2D Input for Virtual Reality Enclosures with Magnetic Field Sensing, *Proc. 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2016)*, pp.176–183 (2016).
- [24] Narimoto, R., Kajita, S., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Wayfinding Behavior Detection by Smartphone, *Proc. 32nd IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2018)*, pp.488–495 (2018).
- [25] Shimada, K., Hiroi, K., Kawaguchi, N. and Kaji, K.: Measurement Methods of Spatial Ability using a Virtual Reality System, *Proc. 9th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2016)*, pp.1–6 (2016).
- [26] Kim, W., Choo, K., Lee, Y., Misra, A. and Balan, R.: Empath-D : VR-based Empathetic App Design for Accessibility, *Proc. 16th ACM International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys 2018)* (2018).
- [27] OpenBSD System Manager’s Manual: hostapd(8) (2015-), available from (<https://man.openbsd.org/hostapd.8>) (accessed 2019-04-19).

推薦文

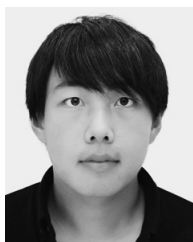
DICOMO2018 の発表論文の中で特に評価が高かったため。また、本研究は都市部の Wi-Fi アクセスポイントの電波強度地図と 3 次元都市モデルをもとに、現実世界を再現した VR 空間上でスマートフォンアプリを利用できる環境を構築することで、現実世界と同じユーザの行動に基づく Wi-Fi 電波環境の調査を VR 空間上で可能にしており、有用な研究結果であることが認められるため。

(モバイルコンピューティングとパーベイスブシステム
研究会主査 河川 信夫)



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研究科卒業。平成 30 年大阪大学大学院博士前期課程修了。平成 30 年大阪大学大学院博士後期課程入学。平成 30 年日本学術振興会特別研究員 DC1。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 年大阪大学大学院博士前期課程修了。平成 28 年大阪大学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工学科卒業。平成 10 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。平成 19 年より大阪大学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 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年大阪大学助手。現在、大阪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。