

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：34406
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2013～2015
課題番号：25330122
研究課題名(和文)クラウドHRANに関する研究

研究課題名(英文)Study on Cloud HRAN

研究代表者

塚本 勝俊 (Tsukamoto, Katsutoshi)

大阪工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：10207342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではWiFiエリアにRoFで直接接続された微小ヘテロジニアス電波空間をオーバレイする実験を行い，WiFiスループット改善ならびにBluetoothとZigBeeの一括RoF伝送を実証した．また，オーバレイ無線ネットワークにおいて帯域に余裕が有るスモールセルへユーザを誘導するワイヤレスエージェントソフトを開発した．誘導の指針には，移動距離，サービス待ち時間，移動への対価ポイントを評価基準にしたAHP分析から求めたユーザ効用関数を用いることを提案した．以上の成果より微小ヘテロジニアス電波空間を直接接続して周波数利用効率を改善するクラウドHRANの基本技術の提案と実証ができた．

研究成果の概要(英文)：In this study, we conducted an experiment that micro-heterogeneous radio space directly connected by using Radio on Fiber (RoF) were overlaid in WiFi area, and demonstrated the WiFi throughput improvement, as well as Bluetooth and ZigBee transparent RoF transmission. For the overlay wireless network, furthermore, we developed the wireless agent and its software that guides the user to a small cell that has more margin in the capacity. The guidance to the small cell is performed according to the user utility function obtained from AHP analysis with the evaluation criteria of the moving distance, the suffered service latency, and the reward points to the movement. From the above results, we have proposed and demonstrated some basic technologies to realize the cloud HRAN to improve the frequency utilization efficiency by direct connection of micro-heterogeneous radio space.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：モバイル通信 無線アクセスネットワーク Radio on Fiber バックフォールネットワーク フロントフォールネットワーク エージェント 効用関数 ワイヤレスクラウド

1. 研究開始当初の背景

無線アクセスでは膨大なモバイルトラフィックを捌ききれずユーザ QoE が保てない問題が顕在化している。従って今後の無線アクセスネットワーク(RAN)では周波数資源やネットワークリソースを有効利用する技術とユーザの環境・プレゼンス・意思に応じた QoE を満足するユーザセントリックサービス提供技術がより一層重要となってきている。

様々な異種(ヘテロジニアス)無線を利用できるようになった中で、ネットワーク全体が一体となって周波数リソース、ネットワークリソースの最適な有効利用を実現するクラウド RAN とそれを構成するための要素技術は重要であり、その中核となる構成技術として、Radio on Fiber を用いたクラウド HRAN (Hybrid Radio Access Network)技術[1]とワイヤレスエージェント技術[2]を検討する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、種々の電波形式をもつヘテロジニアス無線を一体として提供するクラウド HRAN (Hybrid Radio Access Network)を実現するための要素技術の検討として、種々の無線サービスを展開する無線アクセスネットワークの汎用性、柔軟性を高める Radio on Fiber を用いたハイブリッド RAN について検討する。さらに、利用者とサービス提供者をつなぐ種々のリソースの利用効率を最大化しつつ、ユーザセントリック QoE 保証を可能とするワイヤレスエージェントの要素技術について検討することを目的としている。

ワイヤレスエージェントについては、ヘテロジニアスオーバレイネットワークにおいて、ユーザに帯域に余裕のあるエリアへ移動を促しネットワークハンドオーバーすることでトラフィック分散、そしてユーザ効用とオペレータ効用の向上を目指すエージェントシステムの提案とそれを実現するアプリケーションソフトの開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1)Radio on Fiber を用いたハイブリッド RAN

本研究では、RoF を用いた HRAN の構成方式の提案を行い、机上実験系を構築して実証評価する。ハイブリッド RAN 技術として RoF とともに DRoF (digital RoF)を用いた電波空間のイーサネット転送技術の研究に取り組む。

RoF(Radio on Fiber)は光ファイバ無線とも呼ばれ、種々の電波形式の無線信号をその電波形式を維持したまま光ファイバ中に閉じ込めて伝送する技術であり[3]、無線アクセスネットワークの汎用性、柔軟性を高めるハイブリッド RAN を構成できる。モバイルはもちろんのこと、近年は自営波を用いた WiFi、や Zigbee や Bluetooth があり、優れたキャリアセンス能力によって干渉回避を行っているが、全て帯域に限られた 2.4GHz 帯を用いるため実効スループットの本質的な低下は避けられ

ない。そこで本研究では、WiFi サービスが提供されている環境で、ZigBee や Bluetooth で構成された微小電波空間をそのまま RoF に閉じ込めて、別の場所まで転送し空間に開くことで、互いに離れた場所にあるセンサーネットワークを接続する RoF センサーネットワークを提案する。図 1 に概念を示す。これにより必要な場所のみセンサー電波空間をスポット的に構成することができる。

このような RoF システムの机上実験系を構築し、実証実験を行い、WiFi や ZigBee の実効スループット、周波数スペクトルの観点から無線信号品質の測定と評価を行う。

また電波空間を Ethernet 伝送する digital RoF(DRoF)[4]を用いた無線信号伝送についても原理的な実験的評価を行う。

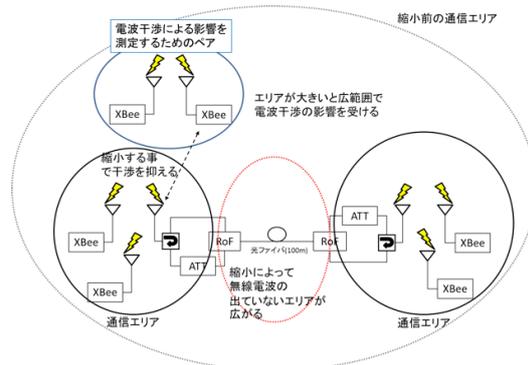


図 1 ヘテロジニアス電波空間の RoF 接続システム概念

(2)ワイヤレスエージェント

本研究では、ユーザの満足度を考慮したスモールセルへのユーザセントリックな誘導を行うワイヤレスエージェントの提案と誘導の指針とするユーザ効用のモデル化、ソフトウェアの開発を目的としている。図 2 にその概念を示す。

ユーザはスモールセルや Wi-Fi スポットへの移動を考えると、そこで十分な QoS の向上が得られ、満足度が高まると期待するならば移動に負担をあまり感じないであろう。しかし、それは移動距離に大きく左右されることが容易に予想される。どの程度の QoS 向上が得られれば、どの程度の距離の移動を厭わないか、についての定量的な指標はこれまでのところほとんど明らかにされていない。また移動を促すインセンティブとして QoS 向上に伴う満足度の改善のみならず、周波数を含むネットワークリソースの有効利用というオペレータ側の要望からオペレータがユーザに移動に対する対価として何らかのポイントを提供することも考えられる。このようなインセンティブ通信の提案は文献[5]で提案されている。

本研究では 2 種類のワイヤレスサービス(動画ストリーミング、ファイルダウンロード)を想定し、移動距離、QoS (サービス待ち時間)、付与されるポイントを評価基準としたワイヤレスサービスの総合重要度(サービ

ス価値)を AHP 分析[6]により導出する。そして、得られた総合重要度から回帰分析によってユーザ効用関数を求める。提案するワイヤレスエージェントは、それを指標にして移動距離の異なるスモールセルの中からいくつかの候補をユーザに提案する。実証システムとして、Android OS 上に実装するアプリケーションソフトウェアを開発する。本ソフトには、ユーザが移動先を決定後、目的のスモールセルまでナビゲーションする機能も含める。

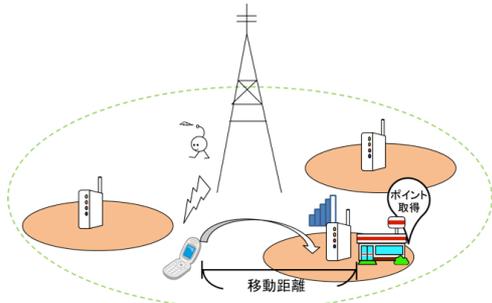


図 2 スモールセルへのユーザセントリックな誘導を行うワイヤレスエージェント

4. 研究成果

(1) Radio on Fiber を用いたハイブリッド RAN

① WiFi 信号の受信電力とスループット

図 3 に実験系の構成を示す。Bluetooth と Zigbee(17ch, 2435MHz) の電波を RoF に閉じ込め、約 20m 離れた 2 つの部屋(A 1509 ゼミ室、B ロッカールーム)間を伝送する。100m の RoF 伝送区間と部屋内の WiFi 電波強度と UDP パケットのスループットを測定した。

WiFi 信号の受信電力測定した結果、RoF 伝送がある場合はもう一方の部屋 B から RoF 伝送された WiFi の放射電波強度が受信され、10m 付近からは増加することが分かった。

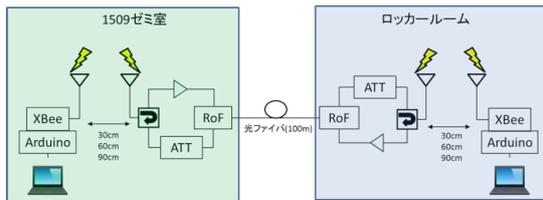


図 3 ヘテロジニアス電波空間の RoF 伝送実験系の構成

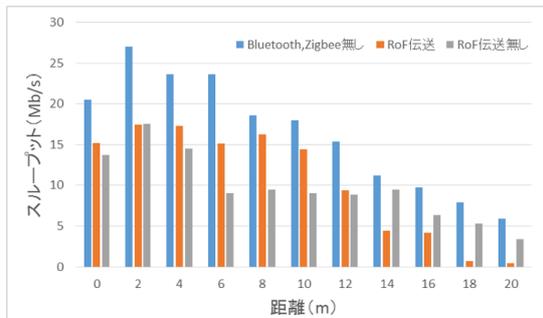


図 4 WiFi 信号のスループット測定結果

図 4 に WiFi 信号のスループット測定結果を示す。同図から分かるように、WiFi 信号の

スループットは Bluetooth、ZigBee が存在し、RoF 伝送しない場合、相互干渉によって、最大 18Mbps、最小 3Mbps に低下するが、RoF 伝送した場合、RoF で伝送している区間では、無線 LAN 信号だけの場合に比べ減少しているものの 15Mbps~16Mbps と RoF 伝送しない場合に比べて 2 倍に改善した。

② ZigBee 電波空間の RoF 伝送

複数の微弱電波規定送信電力の Zigbee モジュールで形成される微小な Zigbee 電波空間同士を 100m の RoF で直接接続する実験を行い、信号受信電力とスループットを測定した結果、RoF により直接接続と比較して約 20dB 損失を受けるが低い電力で形成された微弱電波空間を RoF で接続できた。

次に ZigBee 電波空間を RoF 伝送したときの往復遅延時間を測定した結果、RTT は最大 183msec、最小 26msec、パケット損失率 5.7% が得られ、180cm の距離で直接対向させたときと同等の RTT が得られた。以上より、RTT の観点からは 100m 離れた半径 30cm という微小な Zigbee 電波空間同士を RoF によって接続した場合、約 2m の距離の直接空間接続と同等の RTT で接続できることを実証した。

本実験系を用いて、背景トラフィック存在下での ZigBee モジュール間の実効スループットを測定した結果を図 5 に示す。同図では被測定対象 ZigBee モジュールの RoF 装置のアンテナからの距離を横軸にしている。RoF 伝送時の方が背景トラフィックの影響を受けるものの ZigBee モジュールが RoF 装置のアンテナから 150cm の距離に設置したときのスループットの測定結果からスループットが約 1/3 に低下するものの半径 150cm の ZigBee 電波空間が 100m の距離を隔てて RoF によって電波のまま直接接続できることを実験的に実証できた。ただし、この背景トラフィック発生時のスループット低下原因として隠れ端末が考えられる。その解決は今後の課題とした。

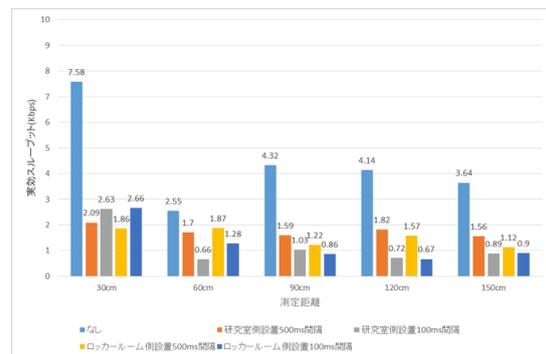


図 5 ZigBee モジュール間の距離と実効スループット測定結果

提案システムを用いれば、サービスが不要な場所には電波が放射されないで、すぐ近くで同一周波数の他の無線サービスエリアを互いに干渉せずに構築でき、周波数の利用効率改善に資する。部屋 A と B に構築された微

小 Zigbee 電波空間を RoF で直接接続したとき、その近傍に置かれた同一周波数を用いる Zigbee モジュールペアの実効スループットを測定した結果を図 6 に示す。同図から 20m 以上離れたと、直接接続に比べて微小電力で RoF 接続の方がスループット向上が確認され、相互干渉抑圧効果を実証することができた。

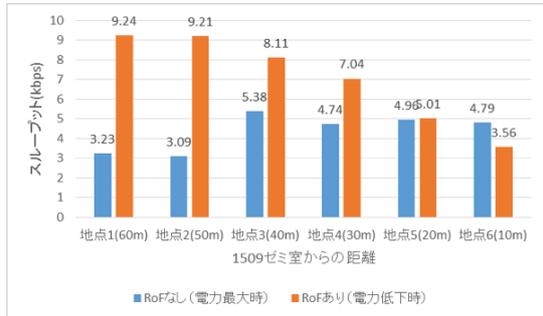


図 6 被干渉ペアの実効スループット

③ 複数の微小ヘテロジニアス電波空間を直接接続する手法には、digital RoF(DRoF)技術を用いて Ethernet 伝送する方式が適用できる。本研究では、電波信号の AD 変換装置として USRP 装置を用いて電波空間転送システムの机上実験系を構築した。実験系の構成を図 7 に示す。VHF 帯の商用 FM 複数局波を一括して AD 変換後、Ethernet 伝送、すなわち DRoF 伝送して、一旦、PC の HDD にストレージする。次にストレージされたデータを別の場所にある USRP まで DRoF 伝送し、USRP の DA 変換によって FM 電波空間を再生、FM 受信機での選局と復調を実証した。2.4GHz 帯信号については、USRP 装置の AD、DA 変換部の帯域制限のため帯域 20MHz の IEEE802.11g 信号 (2462MHz チャネル)を対象として、AD 変換、DRoF 伝送、DA 変換を行い、無線信号の再生をパワースペクトルで確認した。以上により、VHF 帯とマイクロ波帯という異種電波空間を DRoF によって Ethernet 伝送する基本原理を実験的に実証することができた。DRoF 伝送に伴う、SN 比の劣化度、歪特性など信号品質の詳細な評価が残されているが、今後の課題と考えている。

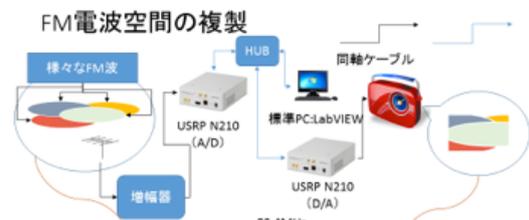


図 7 電波信号の DRoF 伝送実験系の構成

(2)ワイヤレスエージェント

本研究では、移動距離、QoS として待ち時間短縮率、そして移動に対するインセンティブとして付与するポイント量を評価基準とした一対比較アンケート (被験者教 14 名) を行い、AHP 分析によってこれら 3 つの評価基準の重要度と総合重要度を求め、その回帰分析

から得た近似関数を移動先における推定ユーザ効用関数に用いた。集団の意思決定を表す総合重要度は幾何平均値を用いた。アプリケーションは「ファイルダウンロード」、「動画ストリーミング」の 2 種類を仮定し、ポイント量は 1 ポイント=1 円の想定を被験者に説明した。AHP における代替案と AHP 階層図を図 8、9 に示す。

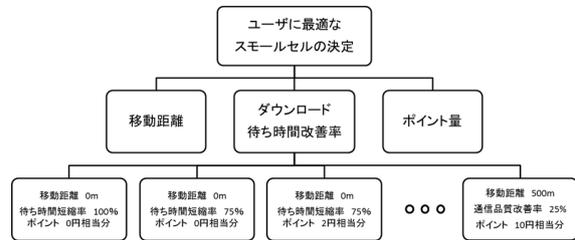


図 8 AHP 階層図 (ファイルダウンロード)

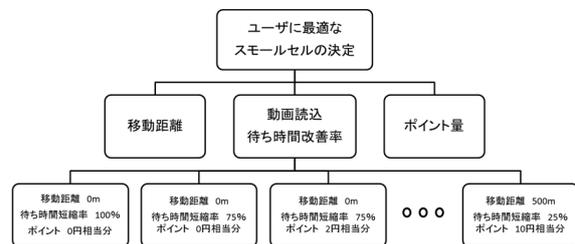


図 9 AHP 階層図 (動画ストリーミング)

① 評価基準の重要度

評価基準「移動距離」の重要度を ω_d 、評価基準「ダウンロード待ち時間短縮率」の重要度を ω_{id} 、評価基準「ポイント量」の重要度を ω_p とし、それらを幾何平均した結果、ファイルダウンロードする際の平均重要度は、

$$\bar{\omega}_s = [\bar{\omega}_d \quad \bar{\omega}_{id} \quad \bar{\omega}_p] = [0.48 \quad 0.35 \quad 0.17] \quad (1)$$

となった。ユーザは移動距離や待ち時間の改善やポイントの順に関心が高いことが分かる。

② 評価基準「移動距離」「ポイント量」「ダウンロード待ち時間短縮率」のそれぞれについて効用関数が次のように求まった。

・評価基準「移動距離」の効用関数

$$X_d(d) = 2.562e^{-0.0059d} \quad (2)$$

寄与率は 0.992 であり、ユーザの移動距離に対する希求水準 160[m]で重要度が 1 となるよう正規化している。

・評価基準「ポイント量」の効用関数

$$X_p(p) = 0.137e^{-0.2504p} \quad (3)$$

寄与率は 0.998 であり、ユーザのポイント量に対する希求水準 $p=7.92$ で重要度が 1 となるよう正規化している。

・ダウンロード待ち時間短縮率の効用関数 (ファイルダウンロード時)

$$X_{id}(i_d) = 3.971e^{-0.0309i_d} \quad (4)$$

寄与率は 0.998 であり、ユーザの待ち時間短縮率に対する希求水準 44.68[%]で重要度が 1 となるよう正規化している。

・読込待ち時間短縮率の効用関数（動画ストリーミング時）

動画ストリーミングの読込待ち時間短縮率に対する重要度を求めるため、動画ストリーミングの総視聴時間を評価基準としたアンケート実施し、一対比較による分析を経て、動画読込時間の代替案に対する重要度を求め、さらに移動元から移動先への動画読込待ち時間の削減量を用いた変換を経て、動画読込待ち時間短縮率[%]の重要度（効用関数）を導出した。動画ストリーミングの読込待ち時間短縮率 i_s [%] に対するサービス価値 X_{is} は、

$$X_{is}(i_s) = -0.0165i_s + 1.7355 \quad (5)$$

のように近似できた。寄与率は0.985であり、希求水準44.68[%]で重要度が1となるよう正規化している。

③総合重要度

以上のように AHP により導出した評価基準「移動距離」、「ダウンロード待ち時間短縮率(動画ストリーミングの場合は読込待ち時間短縮率)」、「付与ポイント量」の近似効用関数と式(1)に示した評価基準の重要度重みを用いて総合重要度（効用関数）を求めた。ユーザをスマートセルへ誘導するワイヤレスエージェントはこれを誘導先の WiFi スポットを選択する指針とする

・ファイルダウンロードにおける集団の総合重要度 $U(d, i_d, p)$:

$$U(d, i_d, p) = 1.222e^{-0.0059d} + 1.410e^{-0.031i_d} + 0.023e^{0.2504p} \quad (6)$$

数値例として図 10 にユーザに移動を促す距離が $d = 200[m]$ の場合の「ファイルダウンロード待ち時間短縮率」と「付与ポイント量」の組合せに対する総合重要度を等高線グラフで示す。付与ポイント量 $p=0$ [円分] のときは待ち時間短縮率 i_d が 28%以下になると、 $p=10$ [円分] のときは i_d が 46%以下になるとユーザは本システムに感じる満足度を維持できることが分かる。

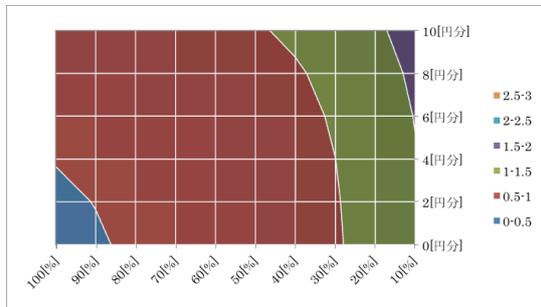


図 10 ダウンロード待ち時間短縮率と付与ポイント量の組合せに対する総合重要度(移動距離 200m)

・動画ストリーミングにおける集団の総合重要度 $U(d, i_s, p)$:

$$U(d, i_s, p) = 1.222e^{-0.0059d} - (0.0058i_s - 0.6163) + 0.023e^{0.2504p} \quad (7)$$

($0 \leq d \leq 500, 17 \leq i_s \leq 100, 0 \leq p \leq 10$)

数値計算例から $p=10$ [円分] のときは i_s が 40%以下になるとユーザは本システムに価値を感じ、移動に応じてくれる可能性があることが分かった。

④ ユーザ効用に基づく Wi-Fi ホットスポットへ誘導するワイヤレスエージェントアプリケーション開発

式(6), (7)に得られた効用関数を用いてワイヤレスエージェントはトラフィック混雑でサービスに不満を持っているユーザに、ユーザ効用を満足させられるのに十分な帯域余裕のある Wi-Fi スポットへ誘導する。その実現手法としてアプリケーションソフトウェアを開発し、そのタブレット端末への実装を行った。

本アプリケーションは、複数ある Wi-Fi スポットの中からユーザ効用に基づき、満足度ができるだけ高まるという意味で最適な Wi-Fi スポットを選択し、ユーザに提案を行う。

・ワイヤレスエージェントアプリケーションの特徴

このアプリケーションは、ファイルダウンロードと動画ストリーミングのそれぞれの「移動距離、待ち時間短縮率、ポイント量」を評価基準とした効用関数で移動先でのユーザ効用を推定し、ユーザの効用を最大限維持しながら、帯域に余裕がある Wi-Fi スポット等のスマートセルへユーザを誘導し、ネットワーク全体でのトラフィック分散と周波数利用効率を改善に寄与する。ただし得られた効用関数は全被験者のアンケート回答を AHP 分析によって得た重要度の平均処理から求めたもののため、集団としての平均的な性向に沿ったものと言える。そこで本ワイヤレスエージェントをユーザ端末側の実装し、エージェントによって提示された3つの移動先から、ユーザが最終的な選択の余地を残すものとした。また、その他に次のような特徴をもつ。

- 本アプリケーションは、ユーザが一つの Wi-Fi スポットを選択すると、その位置情報は既存のナビゲーションアプリケーションに受け渡され、ユーザをその Wi-Fi スポットに誘導する。

- アプリケーション開発で想定するシチュエーション：コンビニ・カフェ・駅の待合所・ファーストフード店などの様々な店舗に Wi-Fi スポットが設置され、通信品質改善の保証以外にもポイントの付与などのインセンティブを受け取れるようなシチュエーションを想定した。アプリケーションのシステム要件として現在位置の把握、端末付近の誘導すべき Wi-Fi スポットの探索、そして誘導には端末の GPS 機能を仮定した。また、付近の Wi-Fi スポットの位置、それらの最新の空き帯域状況は別途ネットワーク上のデータベースから取得することを仮定し、今回の実装では Wi-Fi スポットの位置はあらかじめアプリケーションソフトに与えた。実用化には、これらの情報をもつ

データベースの構築、そこへのネットワーク接続と情報取得が必要であるが今後の課題としたい。

- アプリケーションの機能ブロック：ユーザがアプリケーション種別を選択すると、周辺の Wi-Fi スポットの座標や帯域空き状況、端末の位置情報を取得し、周辺の Wi-Fi スポットまでの距離、移動先での待ち時間短縮率、獲得できるポイント、そして効用関数を用いて総合重要度を算出し、総合重要度の大きい順に 3 つの WiFi スポットを候補として画面に表示する。ユーザが Wi-Fi スポットを選択すると外部のナビゲーションアプリに受け渡され、ユーザはナビゲーションサービスを受ける。
- アプリケーション開発は Android OS のタブレット端末をターゲットとした。画面設計の一例として図 11 に WiFi スポットセレクト画面を示す。3 つの Wi-Fi スポットから 1 つを選択すると、外部のナビゲーションアプリに移行する。ナビゲーション画面は、Google が提供する API を使用した。



図 11 端末の画面設計の一例 (WiFi スポットセレクト画面)

以上のように、ユーザの満足度を推定する効用関数を用いてユーザを Wi-Fi スポットへの誘導するワイヤレスエージェントを実現するアプリケーションソフトウェアを開発し、実際のタブレット端末に実装した。本アプリケーションは、ユーザの満足度を維持・向上しつつ、トラフィックオフロードをすることで周波数利用効率、ネットワークリソース利用効率を高めるソフトウェアのプロトタイプである。

本研究で取り組んだようなワイヤレスエージェントの概念や方式原理は、今後ますますの小セル化と高速化が進む 5G (第 5 世代) モバイルと 4G/3.9G といった新旧のモバイルシステムの併存状況、さらに WiFi など自営波ワイヤレスが協調したヘテロジニアス無線のオーバレイネットワークとその構成手法であるハイブリッド RAN にとって有効な技術となることが期待される。

参考文献

[1]Katsutoshi Tsukamoto, Takuya Yamagami, Takeshi Higashino, and Shozo Komaki : "Radio

on Fiber Technologies and Their Application Toward Universal Platform for Heterogeneous Wireless Services", PIERS Proceedings, Beijing, Vol.1, No.1, pp.28-33, (March 2009).

[2]Katsutoshi Tsukamoto, Takeshi Higashino, and Shozo Komaki : "Radio Agents Technologies for Wireless-as-a-service Network", PIERS Online, Vol.7, No.5, pp.461-465, (April 2011).

[3]久利敏明,堀内幸夫,中戸川 剛,塚本勝俊 : "光・無線融合技術をベースとする通信・放送システム", 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J91-C, No.1, pp.11-27, (January 2008).

[4]Y. Shoji, Y. Takayama, M. Toyoshima, H. Ohta, "Demonstration of the Trans- portation of a Microwave Environment Over an Optical IP Network," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol.58, No.11, pp.3237-3247, Nov.57, 2010.など

[5]新熊亮一 (著), "ワイヤレスシステムエージェント,"ワイヤレスエージェント技術,小牧省三 (編), (社)丸善株式会社,東京,pp.53-80,2008.

[6]木下栄蔵, " AHP の理論と実際 ", pp.131-158, 丸善株式会社, 2000 など

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

(1) Katsumi Iwatsuki and Katsutoshi Tsukamoto : "Wireless and wired convergence towards next-generation access networks", Proc. of SPIE, Vol.9007, No.9007-05, pp.1-6, San Francisco (USA) (February 2014).

(2) Katsumi Iwatsuki and Katsutoshi Tsukamoto : "Next generation resilient access networks", Proc. of SPIE, Vol.9387, No.9387-0J, pp.1-8, San Francisco (USA) (February 2015).

(3) 塚本 勝俊 : "5G における光無線融合", 2015 年信学会総大会, Vol.1, No.1, p.BP-1-7, 立命館大学(滋賀県・草津市) (March 2015).

(4) Katsutoshi Tsukamoto and Kazuo Kumamoto : "Study on Hybrid RAN Using RoF and RoR for Distributed Small Cell Configurations", 2015 URSI-Japan Radio Science Meeting (URSI-JRSM 2015), Tokyo, Vol., No.D2, p. 50, 東京工業大学(東京都・目黒区) (September 2015).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塚本 勝俊 (TSUKAMOTO, Katsutoshi)

大阪工業大学・情報科学部情報ネットワーク学科・教授

研究者番号: 10207342