

Wi-Fi アクセスポイントの自律制御のための 通信品質予測に基づくチャンネル選択手法

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

受付日 2018年10月3日, 採録日 2019年4月9日

概要: 本研究では, 多数のアクセスポイント (AP) の混在により混雑をきわめる都市部の 2.4 GHz Wi-Fi 環境において, チャンネル間の利用周波数重複によるチャンネル間干渉の影響を低減するような AP 向けチャンネル選択手法を提案する. 提案手法により, 自律チャンネル制御による干渉回避手法の実現と同時に, 有限なチャンネル資源のより効率的な活用を目指す. 対象とする AP において, MAC フレーム観測を実施することで各チャンネルの利用状況を把握し, これに基づきチャンネル切り替えの指標となる通信品質を予測する関数を設計する. 予測関数は, トラフィック飽和に基づく分類器と飽和時にどれほど厳しい飽和状態にあるのかを定量化する重回帰式によって構成され, ネットワークシミュレータで作成した訓練データを用いて構築した. 大阪市で実際に収集した AP 設置情報を用いた評価実験において, 提案手法は, ランダムなチャンネル選択と比較し, スループットが 1.83 倍となることを示した.

キーワード: Wi-Fi 過密化, 都市環境, 電波干渉, チャンネル間干渉, チャンネルマイグレーション

Prediction-based Channel Selection Algorithm for Autonomous Wi-Fi Access Point Management

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

Received: October 3, 2018, Accepted: April 9, 2019

Abstract: This paper presents prediction-based channel selection algorithm to design autonomous channel migration scheme at the target Wi-Fi access point (AP). Our algorithm aims to more effective usage of limited channel resources by considering partial overlapping channel interference in urban area. We design channel performance prediction function based on IEEE802.11 MAC frame monitoring to catch the current channel usage. The function is composed of an SVM-based classifier to estimate capacity saturation and regression functions to estimate the channel performance. The training dataset for the machine learning is created by a highly-precise network simulator. We show that proposed method can predict the best channel and that APs can migrate to them in the urban scenarios. We create the urban scenarios by using Wi-Fi Scan Map of Osaka City and traffic monitoring experiment. As a result, the throughput of the target AP can achieve 1.83 times higher than that of the AP which randomly selects channels.

Keywords: Wi-Fi dense environment, interference, partial channel overlapping, channel migration

1. はじめに

2020 年の東京オリンピック・パラリンピックといった巨

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, Los Angeles, CA
90095, USA

大イベントの開催に合わせ, パブリックスペースにおける Wi-Fi 通信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となっている. 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 月に公表している. また, Wi-Fi は災害時の携帯通信網

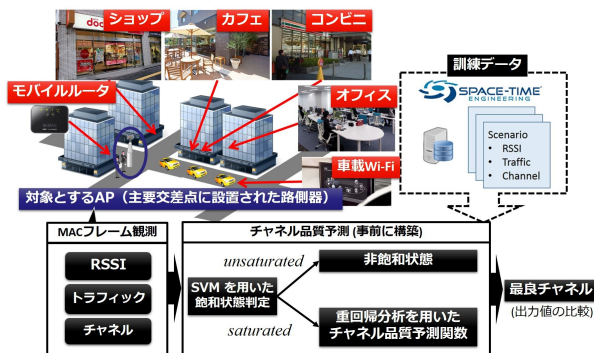


図 1 AP における Wi-Fi チャンネル品質予測に基づくチャンネル選択
 Fig. 1 Prediction-based channel selection at the AP.

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では、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 1 つとなり、様々な環境での活用が期待されている。

しかし、特に都市部は様々なサービスがカバレッジ向上のため Wi-Fi AP を密に設置している 1 種の競合状態にあり、通信混雑環境における混沌とした周波数利用に拍車をかけている。このような過密 Wi-Fi 問題に対し、IEEE 802.11ax 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]。これに対し、我々は、部分的なチャンネル間の重畳によるチャンネル間干渉を考慮した自律チャンネル制御を実施する AP の実現を通して、様々な Wi-Fi システムが混在する都市環境において、有限なチャンネル資源の効率的な活用を目指している [2], [3], [4]。

本研究では、AP における自律チャンネル制御に必要な、どのチャンネルへ移動すべきかを判断するためのチャンネル選択手法の提案を行う。提案手法の概要を図 1 に示す。提案手法は、トラフィックや受信信号強度 (RSSI) の多様な組み合わせによる干渉影響に加えて、チャンネル間干渉を考慮するため、一般の商用 Wi-Fi チップセットでも実施可能な IEEE802.11 MAC フレーム観測を導入し干渉状況を把握する。この MAC フレーム観測結果を入力とし、AP があるチャンネルを使用したときに予想される通信品質を、チャンネルごとに予測する関数を設計している。提案手法は、各チャンネルの品質予測値の比較により最良のチャンネルを選択する。予測関数の設計として、チャンネル資源は有限であることから、チャンネル状態には飽和状態 (saturated) と非飽和状態 (unsaturated) の 2 種類の状態が存在する

と定義し、どちらの状態かを観測値から予測する 2 値分類器を SVM (Support Vector Machine) を用いて構築している。分類器により非飽和状態と分類された場合は、チャンネル品質が理想的であるとし、干渉によるチャンネル品質の低下がないものとして扱う。飽和状態として分類された場合、干渉によりそのチャンネルがどれほど逼迫した状態であるかを、重回帰分析により構築した重回帰式により予測する。これらからなる通信品質予測関数は、多様な干渉環境への適用可能性を高めるため、ネットワークシミュレータ Scenargie [5] を用い、計 10,000 ケースを超えるシミュレーションを実施することで干渉データセットを作成し、訓練データとして利用している。

提案した予測関数および現実の都市環境に即したシナリオを用いた評価実験を実施した。都市部を模した評価シナリオをシミュレータ上で再現するため、我々のグループがスマートフォンを用いたクラウドソーシングにより作成している大阪市 Wi-Fi 電波マップ [6], [7] を活用して、実在する Wi-Fi AP の位置情報と稼働チャンネルを取得している。さらに、Wi-Fi プロトコル・アナライザである AirPcap [8] を用いた大阪市におけるトラフィック測定により得られた知見に基づき、いくつかのパラメータ設定を行うことでより現実的なシナリオとしている。構築した評価シナリオにおいて、提案手法を用いることで全 13 チャンネルの中で最も通信品質の高いチャンネルを選択することが可能であることを確認することができた。また、実際にチャンネル切り替えを実施することでどれほどのスループット向上が得られるのかを評価した結果、提案手法により、AP のスループットがランダムにチャンネルを選択した場合と比較して 1.83 倍となることを確認した。

2. 関連研究

協調が期待できない自律環境における Wi-Fi AP のチャンネル制御についてはこれまでに様々な取り組みがなされている。しかし、既存手法では、相互に周波数重複がないチャンネルのみを活用する方式が多い。そのためには全 AP がある一定の規則にしたがって利用チャンネルを制限を設けることが必要であり、複数のサービス提供者が存在する都市環境での適用を考えた場合現実的ではない。これに対し、近年、2.4GHz 帯において部分的に重なりのあるチャンネルの利用可能性に関する検討が注目されている [9], [10], [11], [12]。つまり、チャンネル間干渉を許容することによって、ネットワークキャパシティの増加およびネットワークスループットの向上が期待されている。文献 [13] では、2.4GHz 帯におけるチャンネル間距離 (中心周波数の距離) とアクセスポイントの物理的距離との干渉関係について言及している。また、文献 [13] での干渉関係に基づいて、文献 [10], [11], [14] では、自律分散的に各アクセスポイントが動的チャンネル選択を繰り返すことによって、最良チャンネル割当てを含む

ナッシュ均衡点へ収束することが示されている。この方法では、ネットワーク内の各ノードは隣接する干渉ノード数を減らすように振る舞うものと仮定した場合、ポテンシャルゲームとしてネットワーク全体の振舞いをとらえることで収束性を示している。この文献では、先に述べた干渉グラフに基づいて決定されているが、本論文で提案する干渉影響による通信品質予測部を組み込むことでより高度な運用が可能となる。

文献 [15] 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 選択方法を提案している。クライアントは干渉と送信遅延を測定するだけでなく、本論文の予測関数と同じく物理層の観測情報を必要としない利点があるが、公平性を目的としている点で異なる。また、Bluetooth やその他のシステムに組み込まれているチャンネルホッピングは、あらかじめ準備されたシーケンスに従ってチャンネルを切り替えて通信を行うことにより、ある特定チャンネルから受ける長期的な干渉の影響を低減する解決法の 1 つである。文献 [16] では、Wi-Fi システムにおいてホッピングを行うために動的にチャンネルシーケンスを作成している。これらのアプローチでは本論文で提案しているような干渉影響の把握が必須であり、本論文の予測関数の活用が期待できる。

過密な Wi-Fi AP の設置に対して、チャンネル選択以外のアルゴリズムによるアプローチも従来より研究されている。IEEE 802.11ax [1] 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で、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。キャリアセンス閾値調整に関して、文献 [17] では、Wi-Fi AP が密集する環境において、多くの AP は初期設定で最大出力で動作するように設定されており、不必要な干渉が発生しているといった興味深い事実を指摘している。しかし、AP によって送信電力の調整を行うと単方向リンク化が発生してしまう可能性があるため、文献 [18] 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提案している。これらの手法では、チャンネル選択に関しては考慮されておらず、併用することでより高度な干渉対策アルゴリズムの実現が可能となると考える。

これらに対し、我々は、干渉回避のシンプルかつ効果的な手法としてチャンネル選択を採用し、MAC フレーム観測による干渉環境のセンシングに基づくチャンネル間干渉を考慮したチャンネル品質予測と、その結果に基づくチャンネル切り替えを自律的に行うような AP の提案を目標としている。文献 [4] では、本目標の基礎的な検討として、周辺の AP やそのクライアントが利用しているチャンネルおよび各チャンネルで送受信されるフレームの占有時間と RSSI を MAC フレーム観測により把握することによる、干渉影響の定量的かつチャンネル相対的なスコア化関数を、網羅的シミュ

レーションと重回帰分析に基づき構築している。このアプローチに基づき、本研究では、AP がチャンネルの切り替えを実施した際に期待される通信品質予測に基づくチャンネル選択手法を提案する。これにより、文献 [4] で実現した干渉影響の有無の把握だけでなく、自律チャンネル制御へ向けたチャンネル切り替えを行うべきかの判断を可能とする。具体的には、切り替えを実施する AP が現在利用中のチャンネルで送受信するトラフィックが、切り替え候補チャンネルにおいてどのような影響をもたらすのかを通信品質として予測する。通信品質予測の精度向上のため、チャンネル間干渉だけでなく、チャンネル資源の有限性にも着目し、SVM に基づくチャンネル飽和分類器を導入する工夫をしている。加えて、実際の都市環境に対する提案手法の適用可能性を検討するため、実在する Wi-Fi AP の位置情報や稼働チャンネルおよびトラフィック測定によって得られた知見に基づいた、より現実的な評価環境構築を実施し、性能評価実験を実施している。

3. 予測関数の設計

3.1 MAC フレーム観測と予測関数の入力パラメータ

以下、提案手法を導入する対象となるアクセスポイントを AP で表し、AP と接続している Wi-Fi クライアントを ST で表す。AP (とそのクライアント) は Wi-Fi チャンネル集合 (C とする) 中のチャンネル c_{cur} を現在使用しているとする。そして、AP は同一もしくは異なるチャンネルを使用している干渉 AP やクライアントが送受信する MAC フレームをパッシブに観測する。観測対象となるパラメータは商用 Wi-Fi チップセットのモニタモードで得られるものを基準に選定しており、提案手法では、MAC フレーム長および RSSI を観測する。これら観測値より、AP は各チャンネル k について、(i) チャンネルの時間占有率 $t(k)$ および (ii) 平均受信信号強度割合 $s(k)$ を求める。

$t(k)$ は以下の式で得られる。

$$t(k) = \min \left(\sum_{f \in F(k)} \left(\frac{8 \cdot \text{frame_size}(f)}{\text{data_rate}(f)} + T_{\text{preamble}}(f) \right), 1.0 \right) \quad (1)$$

単位時間あたりに、チャンネル k で稼働する AP およびクライアントで送受信され AP で観測された MAC フレームの集合を $F(k)$ とし、各 MAC フレームのバイトサイズを $\text{frame_size}(f)$ で示す。 $\text{data_rate}(f)$ は観測された各 MAC フレームの送信先クライアントに対するデータレートであり、たとえば IEEE802.11g では 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 もしくは 54 Mbps のいずれかの値をとる。本論文におけるシミュレーションでは、フォールバック機能によるデータレートの動的な制御は想定していないが、各フレームについてそれぞれのデータレートを参照し時間占有率を

算出することにより、データレートがクライアントごとに異なる場合にも適応可能である。また、データフレームが送信される前には第1層の制御情報が付加されているが、その占有時間の直接的な観測は多くの機器において困難であるため、フレーム数に基づく推定占有時間を加算する。具体的には、 $T_{preamble}(f)$ は、各観測 MAC フレーム f の通信規格に基づく、第1層の制御情報が送信される時間の長さを表す。IEEE802.11gにおける $T_{preamble}(f)$ の長さは 20μ 秒の固定値として、以降で利用する。IEEE802.11MACにおけるDIFSやSIFSなどの空白時間や送信までのバックオフ時間のため、実際の計測において $t(k)$ の前項は1.0より大きくなることはないが、最大が1.0となるように定義している。 $t(k)$ は、大きな値をとるほどより高いチャンネル使用率を示す。

$s(k)$ は以下の式で表される。

$$s(k) = \frac{ave_rssi(k) - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}} \quad (2)$$

$ave_rssi(k)$ は、観測チャンネル k で稼働するAPおよびクライアントにおいて送受信されるフレーム集合 $F(k)$ の平均RSSIである。また、 θ_{min} と θ_{max} はそれぞれ、フレームを受信時に観測されると予想されるRSSI値の最小値と最大値を含むような値である。特に θ_{min} に関してはフレーム受信時のプリアンブル閾値を参考に決定し、本研究では $\theta_{min} = -90$ 、 $\theta_{max} = -40$ としている。 $t(k)$ と同様、 $s(k)$ も大きな値をとるほど大きな干渉電力を被ることを示している。

本研究では、APにおいて、チャンネル c_{inf} で干渉源が送受信するIEEE802.11 MAC フレームとそのRSSIを簡易な観測によって取得し、APが c_{cur} から c_{new} へ移動したときに期待される通信品質を求めることを目標とする。そのため、APの切り替え先チャンネル c_{new} における、第2層のフレーム遅延時間を予測する関数 $f_D(c_{new}, c_{inf}, t(c_{inf}), s(c_{inf}), t(c_{cur}))$ と同じく第2層のフレーム到達率を予測する関数 $f_T(c_{new}, c_{inf}, t(c_{inf}), s(c_{inf}), t(c_{cur}))$ を構築する。提案手法では、アプリケーション要求によって通信品質指標を使い分ける場合を考慮し、 f_D および f_T という2種類の指標に対する予測関数を構築する。なお、本論文では、第2層におけるフレーム破損や損失による再送の有無にかかわらず、当該フレームの1度目の送信時刻と正しく受信された時刻差を遅延時間(Delay(s))と定義する。また、フレーム到達率(Frame Delivery Ratio)の計算には、第2層での再送による重複フレームは含めないものとする。 f_D および f_T の入力パラメータとして、直接的なトラフィック干渉を表現するため、対象APの現在のチャンネル利用を表す $t(c_{cur})$ および干渉APのチャンネル利用を表す $t(c_{inf})$ を選択した。また、その干渉の程度は、2.4GHz帯におけるチャンネル重畳の程度を表すチャンネル間の距離 $|c_{cur} - c_{inf}|$ および干渉源からの信号強度 $s(c_{inf})$ との組み合わせに依存

するため、これらも入力パラメータとして選択した。

1つのインターフェイスのみで通信と観測を両立するのは、観測コストを考えると非常に困難であるため、APには複数のインターフェイスを搭載し、観測用と通信用のインターフェイスを切り替えながら、設定パラメータの最適化を実施する方式を前提とする[19]。理想的には全チャンネルを常時観測することが望ましいものの、観測するチャンネルの数が増加すると必要となるインターフェイスの数も増加するため、観測チャンネルを限定している。対象APでは一定時間ごとに観測チャンネルを切り替えて全体チャンネル観測を実施し、定期的に干渉源が使用しているチャンネル群を取得する。その後、観測チャンネルを干渉源が使用しているチャンネル群に限定し、チャンネルごとのトラフィックおよびRSSI情報を収集する。6.1節で述べるように、都市部においてもチャンネル1, 6, 11にAPが集中する傾向が確認されているため、インターフェイス数は最低3つ必要だと考えている。モバイルルータのような移動型APの往来といった、一過性の干渉による頻繁なチャンネル切り替えにともなうオーバーヘッドを避けるため、各チャンネルについてのMACフレーム観測ウィンドウは30秒とし、観測パラメータへの影響が少なくなるように設定している。

3.2 干渉データセットの作成

3.1節で述べた観測値に基づき、多様な干渉環境において通信品質を予測する機能を構築するにあたり、実環境において通信品質の測定データを収集することは困難である。これは、干渉の環境は時空間的に変化することに加えて、実際に通信機器を対象とする環境に設置し通信をさせる必要があるため、十分なデータ数を得るための時間的なコストおよび測定実験を実施するコストが非常に大きいためである。したがって、本研究では、高精度な商用のネットワークシミュレータであるScenargie 1.8[5]を用いることでデータセットを得ることとした。Scenargieは物理層(たとえばOFDMサブチャンネル)からアプリケーションシナリオまでを忠実に実装し統合的なシミュレーションが可能であることから、シミュレーションの結果は実環境における測定データと同様に十分に信頼できると考える。

用意したシミュレーションシナリオにおける各種設定パラメータを表1に示す。具体的には、400m×400mのシミュレーション空間にAPとSTの組(対象AP組)、ならびにそれらの組に干渉を与える別のAPとクライアント(STA)の組(干渉AP組)をシミュレーション空間に設置する。いずれの組においても、APの位置に対し、2次元空間の縦軸正方向に10m離れた位置にSTAを設置した。異なる $s(k)$ の値を表現するため、対象AP組と干渉AP組は、それぞれのAPとSTAの位置関係を保持したまま、横軸方向に20mから20m刻みで400mまでの20通りの異なる距離で設置した。これら対象AP組と干渉AP組が準

表 1 干渉データセット作成のためのシミュレーション設定
Table 1 Simulation settings for building interference dataset.

Parameter	Values
Area Size	400 m×400 m
AP - STA Distance	10 m
Target - Interference Pair Distance	[20 m, 400 m] step=20 m
Wireless Standards	IEEE802.11g
Wireless Band	2.4 GHz
Channels	$c_{new} = 6, c_{inf} \in \{6, 7, 8, 9\}$
Transmission Power	20 dBm
IEEE802.11g Data Rate	9 Mbps (BPSK 3/4)
Antenna Height	1.5 m
T_{preamp}	20 μ s
L7 traffic (Interference AP)	Iperf [0.5 Mbps, 9 Mbps] step=0.5 Mbps
L7 traffic (Target AP)	Iperf [1 Mbps, 9 Mbps] step=1 Mbps
Payload Size	1,470 byte

拠する 2.4 GHz 帯 Wi-Fi の規格は、すでに広く普及している IEEE802.11g とする。通信で利用する帯域幅は標準の 20 MHz とする。802.11n で利用可能な 40 MHz の運用は、2.4 GHz 帯域におけるチャンネル割当ての特性により干渉影響を大きく受けるため現実的でないとし、本論文では想定していない。異なる $t(k)$ の値を表現するため、Scenargie シミュレータ上で実装されている iperf アプリケーションの $iperf-udp-rate-bps$ を変化させることで、対象 AP 組で 18 通り、干渉 AP 組で 9 通り用意した。同アプリケーションにおけるデータ送信は、STA から AP へのアップリンクとし、UDP でフレームを送信する。本論文では、各 AP とその STA 間のデータレートは固定値 (9 Mbps) としており、動的なレートの変更は想定しない。加えて、2.4 GHz 帯 Wi-Fi におけるチャンネル周波数重畳によるチャンネル間干渉を考慮するため、 c_{inf} を 4 通り用意している。

本研究では上記をパラメータセットとし、それらのとりうる値を組み合わることで、計 12,960 ケースのシミュレーションシナリオを用意した。そのもとで、対象 AP 組の通信が干渉 AP 組によってどのように影響を受けるかをシミュレーションで測定し、データセット (干渉データセットとよぶ) を作成した。この干渉データセットを通して、各チャンネルからの被干渉を表現し、それらを組み合わせることで、複数の隣接チャンネルからの影響を予測関数で表現することを目指す。

3.3 予測関数の構築

通信品質予測関数 f_D, f_T を構築するため、干渉データセットにおける設定パラメータの変化による通信品質の変動に着目した。干渉データセットの遅延時間を図 2 に示す。図 2 は、シミュレーションにより得られた遅延時間を、干渉源が存在するチャンネル c_{inf} と対象 AP の移動先チャンネル c_{new} の差 (すなわちチャンネル間距離 $|c_{new} - c_{inf}|$) ごとに分類し、昇順に並べた結果を示している。図 2 から、いずれのチャンネル間距離 $|c_{new} - c_{inf}|$ の遅延時間の遷移に対しても、1,200 ケースから 2,000 ケース付近で急激に遅延時

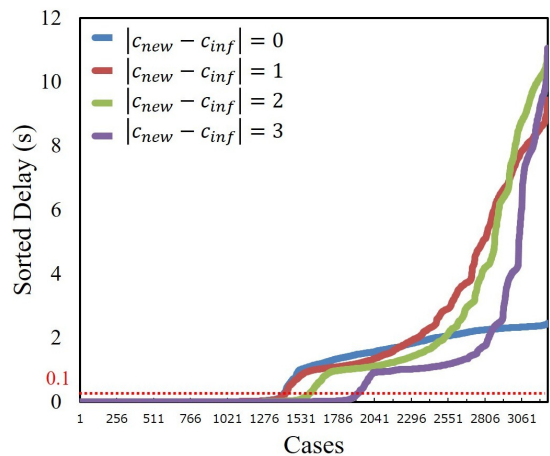


図 2 干渉データセットの遅延時間と飽和状態判定の閾値
Fig. 2 Delay values of interference dataset and saturation threshold.

間が増大し、通信品質が著しく低下していることが確認できる。増大前と後のケースについて、干渉データセットのシミュレーション設定を確認したところ、チャンネル上で送受信される MAC フレームの流量が増加したことで、チャンネルが飽和状態となったことが要因であると確認された。この飽和状態の前後では通信品質の傾向が大きく異なることから、MAC フレーム観測からチャンネルの飽和状態の把握をすることができれば、予測関数の予測精度の向上が期待できる。

そこで、提案手法では予測関数に対し、関数の条件分岐のために用いるチャンネル飽和状態分類器 sat を導入した。この分類器 $sat(t(c_{inf}), s(c_{inf}), t(c_{cur}))$ は、対象 AP が現在使用するチャンネル c_{cur} にて観測しているトラフィックが、AP がチャンネル c_{new} に切り替えた結果、干渉源が稼働するチャンネル c_{inf} 上のトラフィックとの干渉により、飽和状態を引き起こすかどうかを判別する 2 値の分類器である。本研究では、図 2 より、経験的に遅延時間が 0.1 秒の値を飽和状態判定の閾値と見なし、閾値以下の状態を非飽和状態、閾値より大きい状態を飽和状態として定義する。この定義に基づいて、干渉データセットが持つ 12,960 ケースのデータに対し、‘saturated’ もしくは ‘unsaturated’ のラベル付けを行った。分類器 sat の構築には、SVM に基づく機械学習アルゴリズムを適用し、訓練データとして $(t(c_{inf}), s(c_{inf}), t(c_{cur}), label)$ からなるベクトルを入力として学習を実施した。

分類器 sat によってチャンネルの飽和状態を判別し sat の出力が非飽和状態 ‘unsaturated’ となる場合、干渉影響による通信品質の低下はないものと見なし、遅延時間は 0 秒、フレーム到達率は 100% として扱う。また、AP の切り替え先チャンネル c_{new} と干渉源が利用するチャンネル c_{inf} のチャンネル間距離 $|c_{new} - c_{inf}|$ が 3 より大きい場合についても、干渉影響はないとし同様の扱いとする。2.4 GHz 帯 Wi-Fi で

表 2 f_D の係数値
Table 2 Coefficients of f_D .

Channel	coefficients								
	Distance	u_0	u_1	u_2	u_3	u_4	-	-	-
0		10.08839	11.33052	-6.43820	-0.200706	-9.13417	-	-	-
-		v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
1		5.1669	-12.7752	-9.9034	-2.9089	-33.8512	6.3304	1.8806	0
2		3.809	-23.179	-5.935	-1.185	48.670	2.096	10.822	-13.644
3		-5.232	-23.425	11.473	7.862	38.979	-14.945	14.505	-14.738

表 3 f_T の係数値
Table 3 Coefficients of f_T .

Channel	coefficients								
	Distance	u_0	u_1	u_2	u_3	u_4	-	-	-
0		-0.091064	-1.581287	0.489509	0.109054	0.712960	-	-	-
-		v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
1		0.98471	0.37795	0.13484	-0.17870	-1.88417	-0.49107	0	0
2		1.42418	0.56237	-0.70279	-0.66546	-2.00872	0.41862	0	0
3		2.35717	0.85577	-2.19927	-1.69353	-1.95952	2.12111	-0.17065	0

は、チャンネル間距離が 4 以下であれば周波数重畳が存在するが、予備実験の結果から、現実的にはチャンネル間距離が 4 の場合はほぼ c_{inf} からの干渉の影響が無視できることが確認できているため、チャンネル間干渉はないものとする。

分類器 sat の出力が飽和状態 ‘saturated’ となる場合に AP がどれほど強い干渉影響を受けるかを表現するため、重回帰分析によるフィッティングを実施し予測関数を構築している。重回帰分析は多変量解析で用いられる分析手法の 1 つであり、観測値を説明する独立変数群の線形和からなる多項式を用意し、観測値を最もよく説明するような係数を決定する手法である。図 2 において、飽和状態の遅延時間の変化はチャンネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ ごとに異なることが確認できる。したがって、飽和状態における遅延時間とフレーム到達率予測を行う関数の構築において、チャンネル間距離による場合分けを行い、そのそれぞれで、重回帰分析を適用することで最も誤差の少ない関数を選択する工夫をしている。

飽和状態において、干渉源のチャンネル c_{inf} と対象 AP のチャンネル c_{new} が同じ場合、両方のトラフィックが同じチャンネルで競合することになるため、干渉影響の変化 (図 2 中の青線) が他と大きく異なる。これは、これらのトラフィックの総和が増加するにつれて、キャリアセンスによる送信機会の減少が予想されるためである。これに加えて、図 2 において、対数関数的な変化が確認できるため、トラフィック総和の対数表現を説明変数として加えた回帰式とした。また、干渉源 AP のチャンネル c_{inf} と対象 AP の切り替え先のチャンネル c_{new} の差が 1, 2 もしくは 3 となる場合では、0 のときと比較すると、指数関数的な変化が確認できるため、すべての観測値の協調作用を表す交互作用項を含むような回帰式とした。構築した予想関数 f_D および f_T を、以

下の式 (3), (4) に示す。

$$f_D(c_{\text{new}}, c_{\text{inf}}, t(c_{\text{inf}}), s(c_{\text{inf}}), t(c_{\text{cur}})) = \begin{cases} 0 & (|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}| > 3 \text{ or } sat = \text{“unsaturated”}) \\ u_0 + u_1 \log(t(c_{\text{inf}}) + t(c_{\text{cur}})) \\ + u_2 \cdot t(c_{\text{inf}}) + u_3 \cdot s(c_{\text{inf}}) + u_4 \cdot t(c_{\text{cur}}) & (|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}| = 0 \text{ and } sat = \text{“saturated”}) \\ v_0 + v_1 \cdot t(c_{\text{inf}}) + v_2 \cdot s(c_{\text{inf}}) + v_3 \cdot t(c_{\text{cur}}) \\ + v_4 \cdot t(c_{\text{inf}}) \cdot s(c_{\text{inf}}) + v_5 \cdot s(c_{\text{inf}}) \cdot t(c_{\text{cur}}) \\ + v_6 \cdot t(c_{\text{inf}}) \cdot t(c_{\text{cur}}) + v_7 \cdot t(c_{\text{inf}}) \cdot s(c_{\text{inf}}) \cdot t(c_{\text{cur}}) & (0 < |c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}| \leq 3 \text{ and } sat = \text{“saturated”}) \end{cases} \quad (3)$$

$$f_T(c_{\text{new}}, c_{\text{inf}}, t(c_{\text{inf}}), s(c_{\text{inf}}), t(c_{\text{cur}})) = \begin{cases} 1.0 & (|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}| > 3 \text{ or } sat = \text{“unsaturated”}) \\ u_0 + u_1 \log(t(c_{\text{inf}}) + t(c_{\text{cur}})) \\ + u_2 \cdot t(c_{\text{inf}}) + u_3 \cdot s(c_{\text{inf}}) + u_4 \cdot t(c_{\text{cur}}) & (|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}| = 0 \text{ and } sat = \text{“saturated”}) \\ v_0 + v_1 \cdot t(c_{\text{inf}}) + v_2 \cdot s(c_{\text{inf}}) + v_3 \cdot t(c_{\text{cur}}) \\ + v_4 \cdot t(c_{\text{inf}}) \cdot s(c_{\text{inf}}) + v_5 \cdot s(c_{\text{inf}}) \cdot t(c_{\text{cur}}) \\ + v_6 \cdot t(c_{\text{inf}}) \cdot t(c_{\text{cur}}) + v_7 \cdot t(c_{\text{inf}}) \cdot s(c_{\text{inf}}) \cdot t(c_{\text{cur}}) & (0 < |c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}| \leq 3 \text{ and } sat = \text{“saturated”}) \end{cases} \quad (4)$$

飽和状態の場合の通信品質を予測する関数を得るため、 f_D , f_T のパラメータを決定する。訓練用データセットの中から、‘saturated’ とラベル付けされたデータサンプルのみを抽出した、干渉データセットの飽和状態サブセットを作成する。このサブセットに対して、チャンネル c_{new} とチャンネル c_{inf} 間の距離に応じた重回帰分析を適用することで、式 (3) のパラメータ u_i および v_j ($0 \leq i \leq 4$, $0 \leq j \leq 7$) を決定している。得られたパラメータ値を表 2 および表 3 にまとめる。本研究では、重回帰分析を用いたモデル構築

表 4 複数チャネルシミュレーションの設定

Table 4 Simulation settings of multiple channel interference.

Parameter	Values
Interference APs - Target AP Distance	100 m
L7 traffic (Interference APs)	3 Mbps
L7 traffic (Target AP)	9 Mbps
IEEE802.11g Data Rate	9 Mbps (BPSK 3/4)
Channels	$c_{new} = 6, c_{inf} = 6, \{7, 8, 9\}$

において、AIC（赤池情報基準）に基づいた説明変数の選択を導入している。その結果として、表 2、表 3 における値 0 は、通信品質である遅延時間やフレーム到達率の予測に対し、その項による影響が非常に小さく、AIC により説明変数として棄却されたことを示している。

3.4 隣接する複数チャネルからの影響

これまでに提案した予測関数はある単一チャネルからの干渉状態を把握し、通信品質を予測することができるが、2.4GHz 帯 Wi-Fi チャネル間の周波数重複を考慮すると、近接する複数チャネルからの影響を複合的にとらえる必要がある。一方で、提案手法の設計方針に則り、段階的に設定パラメータを変化させた干渉データセットを複数チャネルからの影響を考慮するために構築しようとする、設定パラメータの個数および設定値数の増加により、組合せ総数が爆発的に増加するため現実的ではない。そこで、提案手法では干渉源となる AP が複数チャネルにわたって存在している環境に対し、単一チャネルごとの予測値の組み合わせにより複数チャネルからの干渉の影響を表現する。

この目的のため、複数の隣接チャネルに存在する干渉源から対象 AP が干渉影響を被るようなシミュレーションシナリオを用意した。干渉源が稼働するチャネル c_{inf} は、AP が使用するチャネル c_{new} からのチャネル間距離が 3 以下となるようなチャネルセットの中から 2 つ選択するものとし、1 つは c_{new} と同じチャネル、もう 1 つはチャネル間距離を 1~3 と変化させた。構築したシナリオを、それぞれ (0,1), (0,2), (0,3) と表記する。選ばれたチャネル上で干渉源となる AP とそのクライアントはそれぞれ 1 組ずつ稼働している。本シミュレーション設定を表 4 に示す。

対象 AP で観測された遅延時間の結果を図 3 の青い棒グラフに示す。この図から、複数チャネルからの影響により、同じチャネルからの影響のみを受けた場合 ((0, none), 右端の棒グラフ) と比較して遅延時間が増加し通信品質が悪化することが確認できた。また、その悪化の程度は干渉源のチャネル間距離に応じて変化し、距離がより近いチャネルの影響をより強く受けることが確認できた。これら結果より、対象 AP が使用する c_{new} の予測値は各チャネルに対する出力値 f_D, f_T の重み付け和として表現し、チャネル間距離 $|c_{inf} - c_{new}|$ に基づく重み付け係数の設計を実施した。対象 AP が使用するチャネル c_{new} と干渉源が使用

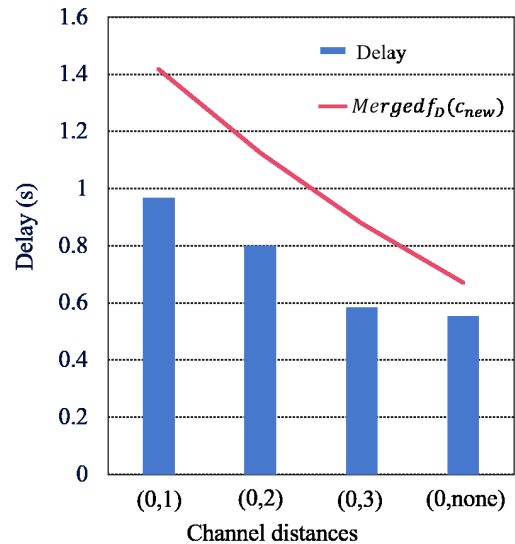


図 3 干渉源が利用するチャネル組と遅延時間の関係

Fig. 3 Relationship between interference AP's channels and delay.

するチャネル c_{inf} が使用するチャネルが同じ場合に、等倍の重み付け係数となるように係数を設計し、以下の式 (5) で表現する。

$$Merged f_D(c_{new}) = \sum_{c_{inf} \in C} \frac{1}{(|c_{inf} - c_{new}| + 1)^2} \cdot f_D \quad (5)$$

複数チャネルからの影響を集約する式 (5) の出力値を図 3 の赤線に示す。図 3 の結果から、対象 AP が影響を被る複数チャネルからの影響の傾向を式 (5) が追従できることを確認した。また、その追従性能を調べるため、式 (5) の出力値と遅延時間の真値の相関係数を計算した結果、0.97 と非常に高い正の相関となったことを確認している。

4. 予測関数の精度評価

構築した予測関数である f_D および f_T による遅延時間およびフレーム到達率に対する予測性能を検証する。そこで、表 1 に示す干渉データセットから無作為に 2,592 のシナリオを抽出し、重複がないよう訓練データセットと評価データセットを用意した。

まず、分類器 *sat* に基づく分類の結果を表 5 に示す。ここでは、チャネル間距離 $|c_{new} - c_{inf}|=0, 1, 2$ または 3 によって分割された 4 つの表（混合行列）を示している。列は真値を示し、行は *sat* の出力を示している。この結果から、平均誤り率は 1.2% となっていることから、誤差は十分に小さな値であることが分かる。

次に、干渉データセットにより作成した飽和状態で使用する重回帰関数が訓練データに対して十分に傾向をとらえられているか検証する。重回帰分析を使用しているため、作成した重回帰関数がどれほど真値と一致しているかを示すためによく用いられる自由度調整済み決定係数 (R^2) を

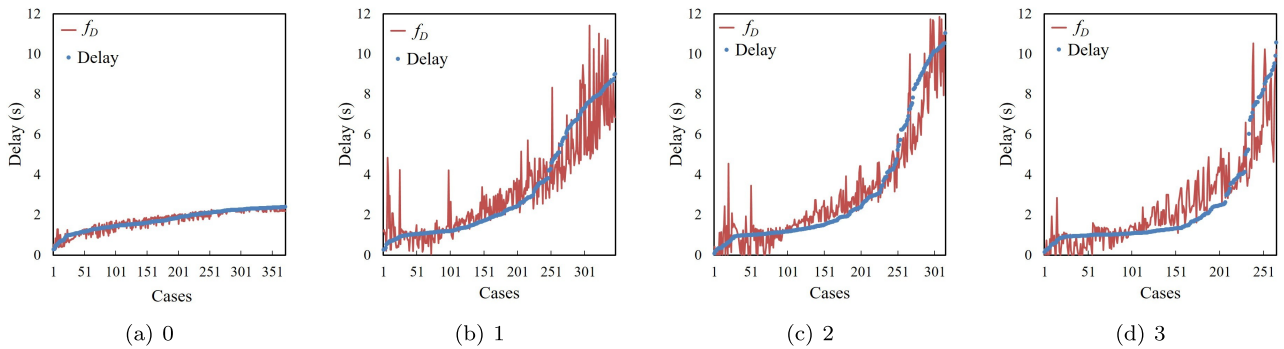


図 4 チャンネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ ごとの f_D と真値の比較
 Fig. 4 Comparison f_D and ground truth per $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$.

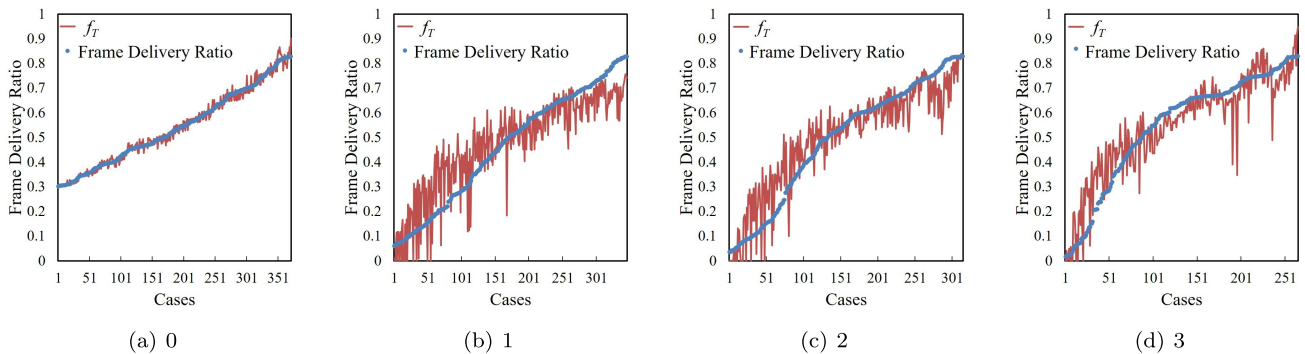


図 5 チャンネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ ごとの f_T と真値の比較
 Fig. 5 Comparison f_T and ground truth per $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$.

表 5 チャンネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ ごとの分類器 *sat* の分類結果

Table 5 *sat*'s classification result per channel distance $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$.

(a) 0			(b) 1		
	T	F		T	F
T	372	9	T	357	4
F	4	263	F	4	283

(c) 2			(d) 3		
	T	F		T	F
T	323	3	T	271	1
F	3	319	F	4	372

表 6 チャンネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ ごとの f_D および f_T の決定係数

Table 6 Coefficients of determination of f_D and f_T per $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$.

Channel Distance	Co. of Det. (R^2)	
	f_D	f_T
0	0.8215	0.9815
1	0.7906	0.7520
2	0.8463	0.8161
3	0.8306	0.8796

表 7 チャンネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ ごとの f_D と f_T の平均二乗誤差

Table 7 Average mean square errors of f_D and f_T per $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$.

Channel Distance	Ave. Mean Square Errors	
	f_D (sec.)	f_T (ratio)
0	0.1759	0.0178
1	1.1545	0.1055
2	0.9894	0.0897
3	1.1358	0.0879

参照する。 R^2 の値は 1.0 に近づくほど良いとされる。各関数に対して算出した R^2 をまとめた結果を表 6 に示す。表に示したとおり、多くの場合において 0.8 を超える値となっており、重回帰モデルは遅延時間とフレーム到達率の振舞いをよくとらえることができていると分かる。特に、 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}| = 0$ 時のフレーム到達率を予測するモデルが最も良く、0.98 を達成している。

最後に、遅延時間とフレーム到達率予測の精度を示す。評価用に用意した 2,592 ケースのデータサンプルから分類器 *sat* によって飽和状態になると分類されたデータサンプル値 (シミュレーションで得られた値、以下真値とよぶ) に対して、重回帰関数による予測値を図 4 と図 5 に示す。これらの図より、全体を通して真値に対して予測関数によ

る予測値が変化の傾向をとらえられていることが分かる。表 7 に回帰関数の予測値とシミュレーション値の平均二乗誤差をまとめている。この結果より、最も精度が良いのはチャンネル間距離が 0 のときであることが確認できる。他のチャンネル間距離の場合、遅延時間の予測値の平均二乗誤差は約 1 秒、フレーム到達率の予測値の平均二乗誤差は最

大で 0.1 程度となった。測定対象環境に通信クライアントを必要とするアクティブプロービングや提案手法と同じくパッシブな観測を行うもののドライバ変更が必要な関連手法と比較して、提案手法では観測における導入コストを下げた結果、得られる観測情報がきわめて限定的であることを考慮すると、十分な予測精度を実現できたと考える。続く 5 章において、対象とする地点における相対的なチャンネル品質の傾向を示す指標として利用するレベルで、予測関数が機能するかをより現実的な評価環境において検証する。

5. 都市環境シナリオでの性能評価

5.1 都市環境シナリオの構築

提案手法が現実的な環境において、最良の通信品質を達成できるチャンネルを予測することが可能であるかを検証するため、現実の都市環境情報を利用したシナリオを設計し、評価実験を実施した。本研究で利用しているネットワークシミュレータ Scenargie では OpenStreetMap を利用することで現存するビルなどを含む 3 次元地理情報が利用可能である。これに、実在する Wi-Fi AP の設置位置および稼働チャンネル、トラフィック情報を合わせることで目的のシナリオ設計ができる。

既設の Wi-Fi AP の設置位置および稼働チャンネルの情報は、我々の研究グループで開発およびデータ収集を実施している大阪市 Wi-Fi 電波マップ [6], [7] を利用し設定した。大阪市 Wi-Fi 電波マップでは、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 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）を構築している。図 6 に示すように、大阪市 Wi-Fi 電波マップがカバーしているエリア内から、300m×300m 程度の範囲を切り出し、スマートフォンユーザのビーコン観測データから推定された Wi-Fi AP の

設置位置情報と実際に稼働しているチャンネルの情報を利用している。この大阪市 Wi-Fi 電波マップには、各 AP に係るのトラフィック情報は含まれていない。そこで本研究では、都市部においてトラフィック実測を実施し、実測結果に基づいたトラフィックパラメータの設定を行っている。都市環境として図 7 に示すような大阪駅周辺の計 10 カ所を対象とし、AirPcap を用いた各チャンネル 5 分間のフレーム観測を実施した。全観測結果を各チャンネルについて分類し、データフレームの送受信が行われている AP について、単位時間あたりの平均トラフィック (Mbps) を算出した。これを、各チャンネルにおける AP のプロファイルとして、シミュレータ上の *iperf-udp-rate* の値として設定している。

構築した 3 つの評価環境を図 8 に示す。提案手法を導入する対象 AP は屋外交差点に設置されるものとし、その設置地点がおおよその中心となるように環境を設計した。図中の赤色ノードが対象 AP、青色ノードがそのクライアント *ST*、橙色ノードが AP が保持する MAC フレーム観測用インターフェイスを表している。また、周辺に存在する干渉源として、黒色ノードで AP を、緑色ノードでそのクライアントを表しており、AP に対してクライアントは 5m 上に離れた位置に設置されている。各 AP のデータレートなどのパラメータは、予測関数構築時に利用した表 1 と同様のものを用いる。その他に、電波伝搬モデルとして *WallCount* モデルを適用しており、ビルなどの壁透過による損失を 5dB と設定している。

5.2 提案手法の性能評価結果

用意した都市環境シナリオ（図 8）で提案手法の性能評価実験を実施した。図 8 に示す各評価環境において、対象 AP とそのクライアント *ST* の設定チャンネルのみが異なる 13 のシナリオ（チャンネルが 1 から 13 に設定）を用意した。予測関数の出力値を比較し、最も通信品質が高い（遅延時間が小さい）と予測されたチャンネルが、シミュレーションで実測された通信品質値に基づいて決定される最良チャンネルと一致しているかを検証することで評価実験としている。評価結果を図 9 に示す。シミュレーションでの遅延時間を棒グラフで表しており、各評価環境における最良のチャンネルは遅延時間が最も低いチャンネルであるものとし、

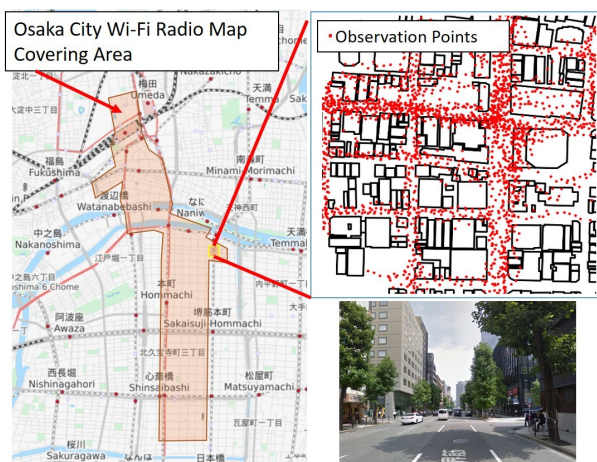


図 6 大阪市 Wi-Fi 電波マップを用いたシナリオ構築

Fig. 6 Scenario construction based on Wi-Fi scan map of Osaka City.



図 7 AirPcap を用いたトラフィック実測

Fig. 7 Traffic monitoring by AirPcap.

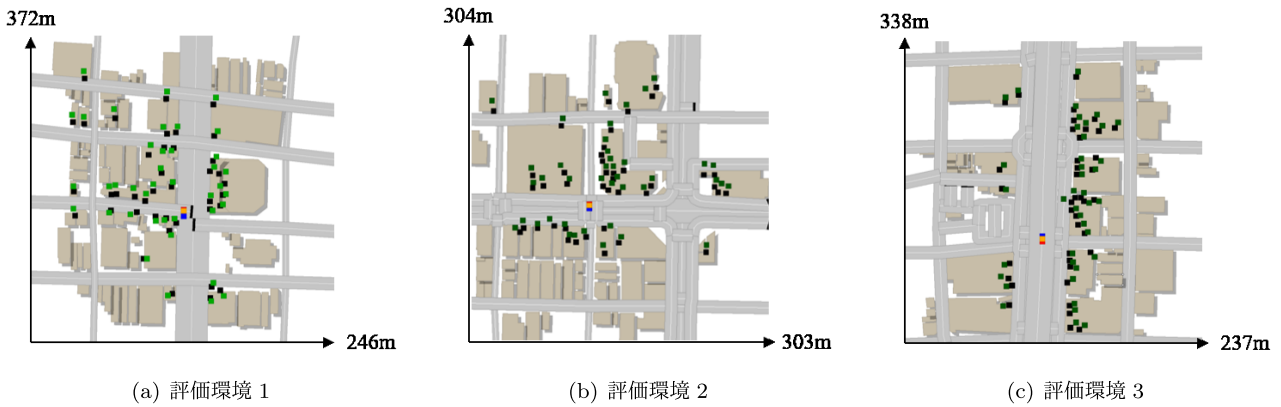


図 8 都市環境シナリオにおける評価環境
Fig. 8 Evaluation environment in urban scenario.

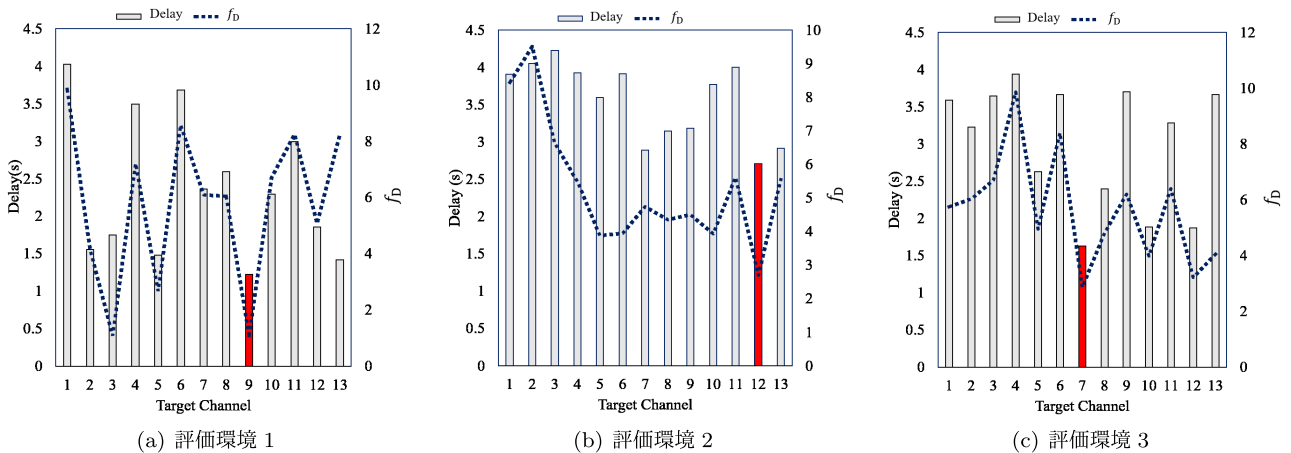


図 9 都市環境シナリオでの評価結果
Fig. 9 Evaluation result of urban scenario.

それらの遅延時間を赤色で示している（それぞれチャンネル 9, チャンネル 12, チャンネル 7）. また, 予測関数の出力も, チャンネル 9, チャンネル 12, チャンネル 7 がそれぞれ最良であると判断された. 予測関数の出力値と遅延時間の真値の相関係数は, それぞれ 0.75, 0.73, 0.78 と強い正の相関が確認され, 予測値と実測値の全チャンネルにわたる傾向が一致することを確認している. これらの結果から, 都市環境を模した現実的なシナリオにおいても, 提案手法を用いることで最良のチャンネルを予測することが可能であることが確認できた.

5.3 チャンネル選択の有効性検証

提案手法による対象 AP のチャンネル選択の効用を確認するため, 他の基本的なチャンネル選択手法との比較実験を実施した. 本比較実験では, 他の手法と性能比較を行ううえでより一般的な尺度での比較となるようスループットでの比較としている.

以下の 4 つの手法を比較手法として選定した.

- チャンネルをランダムに選択する手法 (Randomly Selection, RS)

- Beacon 観測に基づく競合 AP 数の少ないチャンネルを選択する手法 (Least Congested Channel Scan, LCCS [20])
- 単一チャンネルのトラフィック観測に基づいて, 各チャンネルで観測されたトラフィックが最も少ないチャンネルを選択する手法 (Least Traffic Channel (Single Channel), LTC (SC))
- 隣接チャンネルを含むトラフィック観測に基づいて, 注目しているチャンネルとそれに隣接するチャンネルのトラフィックの総和が最も少ないチャンネルを選択する手法 (Least Traffic Channel (Adjacent Channel), LTC (AC))

RS では, その期待値として全チャンネルのスループット平均値を算出している. LCCS では, 対象 AP において Beacon 観測を実施し各チャンネルで競合するユニークな AP 数を計測し, 最も競合数の少ないチャンネルを選択した. 本比較実験は, 図 8 に示した各評価環境で実施した.

比較実験の結果を表 8 に示す. 評価環境 1 では, LCCS と LTC (SC), LTC (AC) と Prop. が同じチャンネルを選択しており, LTC (AC) と Prop. が最もスループットの良

いチャンネルを選択できていることを確認した。RS に比べるとスループットが1.83 倍に、LCCS/LTC (SC) と比較しても1.26 倍となることを確認した。一方で、その他の評価環境では、Prop. のみが最良チャンネルの選択が可能であることを確認した。ここで、各評価環境における干渉 AP の稼働チャンネルを表 9 に示す。この表から、評価環境 1 と比較して評価環境 2 や 3 の方が、干渉 AP のチャンネル分布に分散していることが確認でき、隣接チャンネルからの影響をより精細に考慮しなくてはならない環境であったといえる。その結果として、互いに影響のないチャンネル 1, 6, 11 に干渉 AP が集中する評価環境 1 では LTC (AC) でも最良チャンネルの選択が可能である一方で、評価環境 2 や 3 では、LTC (SC) は RS よりも性能の悪いチャンネルを選択していることが示されている。LTC (AC) についても、比較手法の中では比較的良いチャンネルを選択できているものの最良ではなく、提案手法で実施したようなチャンネル間干渉におけるトラフィックと RSSI の関係性を考慮する必要があることを確認した。評価環境 2 と 3 のそれぞれについて、LTC (AC) と比較して、Prop. で選択したチャンネルの

表 8 スループットによる比較評価の結果
Table 8 Throughput comparison result.

(Mbps)	RS	LCCS [20]	LTC (SC)	LTC (AC)	Prop.
評価環境 1	2.35	3.41	3.41	4.30	4.30
評価環境 2	0.85	1.27	0.73	1.32	1.76
評価環境 3	1.27	1.96	1.11	2.72	3.21

表 9 各評価環境におけるチャンネルごとの干渉 AP 数
Table 9 The number of APs in each scenario.

評価環境	Channel Number												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	14	1	0	2	0	9	1	1	0	1	8	2	2
2	8	3	2	3	2	5	3	2	1	1	7	1	2
3	8	1	2	3	1	6	1	2	3	1	6	1	5

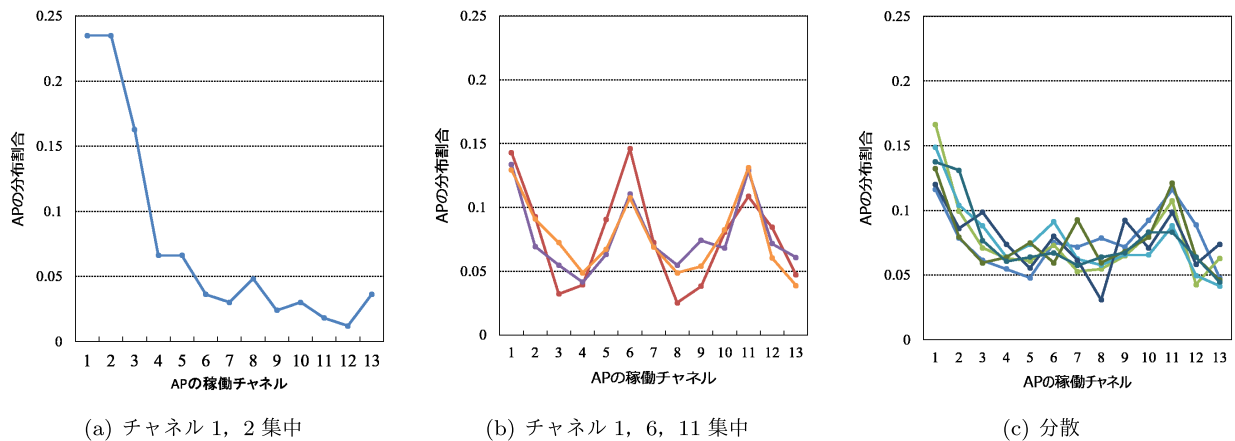


図 10 分類された 3 種類の AP 分布
Fig. 10 3 kinds of AP distribution ratio.

スループットが1.33 倍, 1.18 倍となることを確認した。この結果から、提案手法より、MAC フレーム観測と予測関数によるチャンネル選択を実施することで、チャンネル間干渉を考慮することが可能となり、周辺の干渉状態に合わせたチャンネル制御が可能となると考えられる。

6. 現在の取り組み

6.1 チャンネル利用傾向情報の予測への応用

図 7 に示した AirPcap を用いたトラフィック実測の結果、特定のチャンネルに AP が集中する傾向が確認された。各トラフィック実測地点、各チャンネルで稼働する AP 数を取得するため、Beacon フレームと Probe Response フレームの送信元 MAC アドレスのユニーク数をカウントした。各チャンネルに対する AP の存在割合を k-means アルゴリズムを用いてクラスタリングした結果、3 種類の分布にクラスタリングされることを確認した。クラスタリング結果に基づいて分類した、各地点、各チャンネルにおける AP 分布を図 10 に示す。初期設定のまま AP の設置が行われていると考えられるチャンネル 1, 2 に集中した分布、商業ビル内といった管理者が存在し稼働チャンネルに重複がないよう割当てがなされているチャンネル 1, 6, 11 に集中した分布、屋外テラスなどで様々なサービスが存在し非協調的な動作が予想される分散された分布が観測されている。また、喫茶店などの滞在型店舗の近隣では動画ストリーミングのような連続的トラフィックが検出されるといった傾向も観測されている。さらに、大阪 Wi-Fi 電波マップで収集しているビーコン情報を活用することにより、交差点などにおいて、モバイルルータといった移動性端末の往来に関する時間的特徴を活用することができると考える。このような時空間的な傾向を確率モデルとして提案手法のチャンネル予測に適用することで、提案手法の高度化が可能だと考えられる。

6.2 今後の展望

提案手法は、各 AP における観測情報のみに基づいて動

作するよう設計しているため、各 AP がそれぞれ自律的にチャンネル選択を実施する。今後の展望として、提案手法を備えた複数 AP が、互いに影響し合う程の位置関係で面的に設置された場合に対する提案手法の拡張を検討している。干渉影響が相互に等しく影響すると仮定すると、各 AP が干渉の最も少ないチャンネルを選択するという行為がネットワーク全体の利益と一致するため、提案手法を導入した複数の AP が近くに存在しても定常状態となると考えられる。しかし、現実的には干渉影響が非対称な状況を考慮する必要があるため、その場合は自己の利益がネットワーク全体の利益と必ずしも一致せず、先行研究で実施されているゲーム理論の導入 [14] といった何らかの調停アルゴリズムの導入が必要であると想定される。提案手法は、先行研究で実施されているような干渉グラフ [13] におけるエッジの重み付けなどに寄与するものと考えられ、より高度な運用が可能となる。

7. まとめ

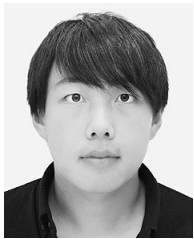
本研究では、2.4GHz Wi-Fi AP における通信品質予測に基づく自律的な干渉回避を目的とした MAC フレーム観測に基づくチャンネル選択手法の提案と現実的な都市環境シナリオを用いた評価を行った。提案手法では、MAC フレーム観測によってチャンネル状況を把握し、これを入力として、チャンネル切り替えの指標となるフレーム到達率と遅延時間を予測する関数を設計している。提案手法は、干渉回避と同時に、部分的な重畳があるチャンネル間の干渉を考慮し最大限活用することで、有限なチャンネル資源のより効率的な利用を目指している。予測関数の構築のため、ネットワークシミュレータ *Scenargie* を用いることで作成した 10,000 以上のシナリオを訓練データとして利用している。予測関数の精度の評価のため、約 2,000 のシナリオを追加で生成し評価実験を行った結果、フレーム到達率に対する予測値の平均二乗誤差が 0.1 程度となることを確認した。また、現実を模した都市環境評価シナリオを構築するため、我々の研究グループが構築している大阪市 Wi-Fi 電波マップを活用することで、実在する Wi-Fi AP の位置情報および稼働チャンネル情報を取得し、AirPcap を用いたトラフィック実測によって得られた知見もシミュレーションへ反映させている。このようにして構築した都市環境シナリオにおいても、提案手法により、最も通信品質の高いチャンネルの予測が可能であることを確認している。提案した予測関数の出力値に基づくチャンネル制御を実施した結果、対象 AP のスループットがランダムにチャンネル選択を実施した場合と比較して 1.83 倍、競合 AP 数ベースの選択アルゴリズムと比較しても 1.26 倍となることを確認した。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP17J05148, JP15H02690, JP26220001 ならびに東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究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., Amano, T., Yamaguchi, H., Higashino, T. and Takai, M.: Wi-Fi Channel Selection Based on Urban Interference Measurement, *Proc. 13th Int. Conf. Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (MobiQuitous 2016)*, pp.143–150 (2016).
- [3] 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 Int. Conf. Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2014)*, pp.642–647 (2014).
- [4] 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 チャンネルの性能予測手法, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.2, pp.745–755 (2016).
- [5] Space-Time Engineering, LLC: Scenargie, available from (<http://www.spacetime-eng.com/>).
- [6] Wi-Fi Scan Map of Osaka City, available from (<http://map.wifibigdata.org>).
- [7] Amano, T., Kajita, S., Yamaguchi, H., Higashino, T. and Takai, M.: A Crowdsourcing and Simulation based Approach for Fast and Accurate Wi-Fi Radio Map Construction in Urban Environment, *Proc. IFIP Networking 2017 (Networking2017)*, pp.1–9 (2017).
- [8] AirPcap: Riverbed, available from (<http://www.riverbed.com/>).
- [9] Şahin, A., Bala, E., Güvenç, İ., Yang, R. and Arslan, H.: Partially Overlapping Tones for Uncoordinated Networks, *IEEE Trans. Communications*, Vol.62, No.9, pp.3363–3375 (2014).
- [10] Zheng, J., Cai, Y., Yang, W., Xu, Y. and Anpalagan, A.: A Game-Theoretic Approach to Exploit Partially Overlapping Channels in Dynamic and Distributed Networks, *IEEE Communications Letters*, Vol.18, No.12, pp.2201–2204 (2014).
- [11] Xu, Y., Wu, Q., Wang, J., Shen, L. and Anpalagan, A.: Opportunistic Spectrum Access Using Partially Overlapping Channels: Graphical Game and Uncoupled Learning, *IEEE Trans. Communications*, Vol.61, No.9, pp.3906–3918 (2013).
- [12] Duarte, P.B.F., Fadlullah, Z.M., Vasilakos, A.V. and Kato, N.: On the Partially Overlapped Channel Assignment on Wireless Mesh Network Backbone: A Game Theoretic Approach, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.30, No.1, pp.119–127 (2012).
- [13] Ding, Y., Huang, Y., Zeng, G. and Xiao, L.: Using Partially Overlapping Channels to Improve Throughput in Wireless Mesh Networks, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.11, No.11, pp.1720–1733 (online), DOI: 10.1109/TMC.2011.215 (2012).
- [14] Zheng, J., Cai, Y., Xu, Y. and Anpalagan, A.: Distributed Channel Selection for Interference Mitigation in Dynamic Environment: A Game-Theoretic Stochastic Learning Solution, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.63, No.9, pp.4757–4762 (2014).
- [15] 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 Int. Conf. Computer Commu-*

- nications (INFOCOM 2007), pp.1451–1459 (2007).
- [16] Mishra, A., Shrivastava, V., Agrawal, D., Banerjee, S. and Ganguly, S.: Distributed channel management in uncoordinated wireless environments, *Proc. ACM 12th Annual Int. Conf. Mobile Computing and Networking (Mobicom 2006)*, pp.170–181 (2006).
- [17] Akella, A., Judd, G., Seshan, S. and Steenkiste, P.: Self-management in Chaotic Wireless Deployments, *Proc. ACM 11th Annual Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom 2005)*, pp.185–199 (2005).
- [18] Mhatre, V., Papagiannaki, K. and Baccelli, F.: Interference Mitigation Through Power Control in High Density 802.11 WLANs, *Proc. 26th IEEE Int. Conf. Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp.535–543 (2007).
- [19] Sen, S., Roy Choudhury, R. and Nelakuditi, S.: No Time to Countdown: Migrating Backoff to the Frequency Domain, *Proc. 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '11*, pp.241–252 (2011).
- [20] Achanta, M.: Method and Apparatus for Least Congested Channel Scan for Wireless Access Points, US Patent No.20060072602 (2006).



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科卒業。平成 28 年大阪大学大学院博士前期課程修了。平成 29 年日本学術振興会特別研究員 DC2。平成 31 年大阪大学大学院博士後期課程修了。Wi-Fi におけるチャンネル干渉に関する

研究に従事。



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。



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。