通信品質予測に基づく自律 Wi-Fi チャネル制御手法

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}

概要:パブリックスペースにおける Wi-Fi 通信の可用性向上が求められている一方で,都市環境では Wi-Fi 過密化がさらに加速することが想定されている.過密化に伴い電波干渉による通信効率の低下が懸念され ており,Wi-Fi を中心プラットフォームとしたサービス参入の障害となる.本研究では,今後想定される Wi-Fi 過密環境において,アクセスポイント (AP)における通信品質予測に基づく干渉回避を目的とした 自律Wi-Fi チャネル制御手法の提案とその評価を行う.提案手法では,対象とする AP において MAC フ レームモニタリングを実施することでチャネル状況を把握し,これを入力として,チャネル切り替えの指 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.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 10% 以下となることを確認した.また,大阪市を対象に収集し た Wi-Fi AP およびトラフィック情報に基づく現在の都市環境に即した評価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ネルを選択することが可能であることを確認している.加えて,提案し た予測関数の出力値に基づくチャ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ネ ルを選択した場合の期待値と比較して約 1.75 倍となることを示した.

1. はじめに

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.特 に日本は 2020 年に東京オリンピック・パラリンピック開 催を控えており,訪日外国人の増加とそれに伴う Wi-Fi 利 用者数の増加が見込まれている.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. 高度交通シス テム (ITS) においても路路間通信や路車間通信への Wi-Fi の活用が検討されており、路側機のセンサから取得した交

 1 大阪大学 大学院情報科学研究科
 Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

² カリフォルニア大学ロサンゼルス校 University of California, Los Angeles 通情報などをWi-Fi通信を用いて路側機間で共有し,車両 ヘフィードバックするシステムも研究されている. このよ うにWi-Fiは重要な社会基盤の一つとなり,様々な環境で の活用が期待されている.

一方で、人口集中都市の中心部ではオフィスの集中、屋 外用 Wi-Fi AP の無秩序かつ過密な設置,モバイルルー ターの急増、ITS 車載器への Wi-Fi 搭載、マルチバンド Wi-Fi チップの増加などにより, Wi-Fi デバイス数は増加 の一途を辿っており、過密環境における混沌とした周波数 利用状況に拍車をかけている.このような過密 Wi-Fi 問 題に対し、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]. 一方, 我々は IEEE 802.11a/g/n など既存のアー キテクチャを持つ一般的な商用 Wi-Fi AP を対象として, 自律的に周波数利用の効率化を実現することが可能な高機 能 AP の提案を目標としている [2,3]. 高機能 AP では, 過密環境における干渉緩和のためのシンプルかつ効果的な 手法としてチャネル切り替えを採用し、どのチャネルへ移 動するべきかを自律的に判断するため, 干渉環境センシン グのコンセプトに基づくチャネル品質予測とその結果に基 づくチャネル選択を実施する.

これまでの研究において、チャネル品質予測手法として、 図1に示すように、Wi-Fiの各チャネルにおける IEEE 802.11 MAC フレームの観測からチャネル切り替え時に想 定される通信品質を予測する関数を設計している.多様な 環境へのロバスト性を得るため、トラフィックや受信信号 強度 (RSSI) の組み合わせによる干渉の多様性や隣接チャ ネルからの影響を加味すべく,計10.000シナリオを超える 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、これに機械学習を適用することで予測関数を構築し ている.チャネル資源の有限性を考慮した結果,チャネル 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、チャネル切り替え 後にどちらの状態となるかを分類する. 非飽和状態と分類 された場合は、チャネル品質が理想的であると判断し遅延 時間やフレームロスがないものとして扱う.一方で,過密 環境においては飽和状態と判断されるケースが多発すると 想定されるため、飽和状態として分類された場合はどれほ ど逼迫した状態であるかを遅延時間やフレーム到達率を予 測することで判断する.予測関数内の分類機として SVM (Support Vector Machine) を、飽和状態時に通信品質を予 測する関数として重回帰分析を適用することで予測関数を 構築している.予測関数の精度の評価のため,約 2,000 の シナリオをテスト用として追加で生成し評価実験を行った 結果, 飽和状態判定の分類誤りは高々 2.0% であり, フレー ム到達率に対する予測値の平均二乗誤差が 10% 程度とな ることを確認した.この予測関数を用いることで各チャネ ルの通信品質予測値を算出し、それらを相対的に比較する ことで最も高い通信品質を提供可能であるチャネルを示唆 することが可能となる.

本研究では、提案した予測関数を、より現実の都市環境 に即したシナリオで評価実験を行う.都市部を模した評価 シナリオをシミュレーション上に構築するため、スマート フォンを用いたクラウドソーシングにより構築した大阪市 Wi-Fi 電波マップ [4,5] の活用により, 実在する Wi-Fi AP の位置情報と稼働チャネルを取得している. さらに, 大阪 市において USB 無線 LAN プロトコル・アナライザ であ る AirPcap [6] を用いたトラフィック実測により得られた 知見を設定パラメータの参考とする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も,提 案手法を用いることで最も通信品質の高いチャネルを選 択することが可能であることを確認することができた. 評 価シナリオに対し提案手法を適用するため、隣接する複数 チャネルからの影響を考慮できるよう提案手法の拡張を 行っている.また,干渉状態が変動し通信品質が最良とな るチャネルが時々刻々と変化するようなシナリオを構築し, 提案手法がチャネル変化に追従できるか、また、チャネル 切り替えを実施することでどれほどの利得が得られるのか



図 1 高機能 AP における Wi-Fi チャネル品質予測

を評価する有効性検証実験を実施した.実験の結果,提案 手法によりチャネル制御を実施することで,高機能 AP の スループットがランダムにチャネルを選択した場合の期待 値と比較して約 1.75 倍となることを示した.

2. 関連研究

協調が期待できない自律環境における AP の Wi-Fi チャ ネル選択についてはこれまでに様々な取り組みがなされて いる.

Bluetooth やその他のシステムに組み込まれているチャ ネルホッピングは,予め準備されたシーケンスに従って チャネルを切り替えて通信を行うことにより,ある特定 チャ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.しかしながら,チャネルホッピングは頻繁 にチャネル切り替えを行うために,ある一定のオーバヘッ ドが必要であり,特に,アクセスポイントとクライアント 間のアソシエーションのためのオーバヘッドも必要となる ことも考慮すると,Wi-Fiシステムは頻繁なホッピングを 想定して設計されていないと言える.文献 [7]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ネル シーケンスを作成している.このようなアプローチがこれ までにいくつか提案されている一方で,どのアプローチに おいても提案手法のようなモニタリングによるチャネル状 態推定が必須となる.

過密な Wi-Fi AP の設置に対して動的にキャリアセンス の閾値の調整を行う手法や送信レートを調整するアルゴリ ズムも従来より研究されている.文献 [8] 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 [9] 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. また文献 [10] 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 選択方法を述べている.クライアントは干渉と送信遅 延を測定するだけでよく,多く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提案手法とは 異なる.なお, [9,10] はいずれも Gibbs サンプリングによ る統計的推測を行っているが,本研究でもこれらの観測学 習手法は予測関数のオンライン構築などに活用できると考 えられる.

RSSI 情報のモニタリングはチャネルの品質推定などに しばしば用いられるが,文献 [11] で指摘されているよう に,第2層での性能を推定するためには SNR や RSSI の みでは不十分である.文献 [12] では,キャリアセンスによ りバックオフの発生を推測する確率モデルを利用すること で,IEEE802.11 MAC におけるフレーム衝突の確率やロス 確率を推定している.一方で,近年の研究 [13] では商用の Wi-Fi カードから得た RSSI の情報のみを利用し正確に非 Wi-Fi 機器の種別判定を行う手法が提案されている.これ は RSSI の情報を短波波形としてモデル化し機械学習させ ることにより実現しており,本研究でも非 Wi-Fi 機器から の干渉判別に活用できると考えられる.

3. 予測関数の設計

3.1 問題の定式化

*AP*を対象とする IEEE802.11g の高機能 AP とし, *ST* を *AP* と接続している Wi-Fi クライアントとする. *AP* (とそのクライアント)は Wi-Fi チャネルセット (*C* とす る)中の 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ネルを使用している他の干渉源と なる AP のトラフィック情報をパッシブにモニタリングす る.モニタリングによって得られた観測値から, *AP* は次 の 2 つの値を観測値の得られたチャネル *k* について求め る;(i)時間的なチャネル使用率(もしくは単にチャネル使 用率)を示す t(k) および(ii)受信信号強度を示す s(k) を 求める.文献 [2] にしたがって,式(1) および(2) に示さ れるような 区間 [0,1] への正規化を行っている. t(k) は以 下の式で定義している.

$$t(k) = \frac{ave_bitrate(k)}{data_rate} + q(k) \cdot T_{preamble}$$
(1)

平均ビットレート (*ave_bitrate*(*k*)) は観測チャネル *k* に おいて観測された全ての MAC データフレームの総バイト 数から得られ, データレート (*data_rate*) は IEEE802.11g において 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 もしくは 54Mbps のい ずれかの値をとる (OFDM PHY の場合). 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, 第 2 層では見ることができないため補正を行う. *q*(*k*) は観測チャネル *k* における全ての干渉源から 1 秒あたり に送信されるデータフレームの受信回数の総和を表し, $T_{preamble}$ は第 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 $T_{preamble}$ の長さは 20 μ 秒で ある. CSMA/CA の特徴である DIFS や SIFS などの一 定の空白時間や送信までのバックオフのため, *t*(*k*) は 1.0

Parameter	Values
Area Size	400m×400m
Interference AP - Target AP Distance	[20m, 400m] step=20m
L7 traffic (Interference AP)	Iperf [1Mbps, 9Mbps] step=0.5Mbps
L7 traffic (Target AP)	Iperf [1Mbps. 9Mbps] step=1Mbps
IEEE802.11g Data Rate	9Mbps (BPSK 3/4)
Channels	$c_{\text{new}} = 6, c_{\text{inf}} \in \{6, 7, 8, 9\}$

より大きくなることは無く,大きな値をとるほどより高い チャネル使用率を示す. *s*(*k*) は以下の式で表される.

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

 $ave_rss(k)$ は、観測チャネル k における干渉源から送信 されるデータフレームの平均 RSSI である.また、 θ_{min} と θ_{max} はそれぞれ、データ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(IEEE802.11g において本研究では、最小値は -90dBm、最大値は -40dBm としている).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 定した. s(k) も t(k) と同様、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 が現在使用しているチャネル c_{cur} から切 り替え先チャネル c_{new} および観測値である $t(c_{inf}), s(c_{inf}),$ $t(c_{cur})$ を入力として, 第 2 層における遅延時間を予測す る予測関数である $f_D(c_{new}, c_{inf}, t(c_{inf}), s(c_{inf}), t(c_{cur}))$ と同 じく第 2 層におけるフレーム到達率を予測する予測関数 である $f_T(c_{new}, c_{inf}, t(c_{inf}), s(c_{inf}), t(c_{cur}))$ という 2 つの 関数を構築している. AP においてチャネル c_{inf} における IEEE802.11 MAC フレームとその RSSI をパッシブなモ ニタリングによって取得し, これらの予測関数を利用する ことで, AP が c_{cur} から c_{new} へ移動した時に予測される 通信品質を求めることができる.

3.2 干渉データセットの作成

このような目的で作成するデータセットは一般に,シナ リオのケース数が膨大(本研究では,計 12,960 ケース用 意している)となるため,実環境においてデータサンプ ルを収集することは,実際に機器を用意し通信させる必 要があるため困難である.本研究では,その代わりに,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 [14] を用いている. Scenargie は物理層(OFDM サブ チャネル)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データサンプルと 同様に十分に信頼できる.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は表1にまとめている.

3.3 予測関数の構築

本研究では delay (遅延時間) =0.1(s) となる点を時間的 な帯域利用が飽和状態であるかどうかの基準点と定義して

いる.これは,干渉データセットにおけるシミュレーショ ンによって得られた遅延時間から経験的に定めた. この妥 当性を示すため,基準点前後の遅延時間の変化の様子を図2 に示す.非飽和状態では,遅延時間とフレーム到達率が干 渉源からのトラフィックに依存せずほぼ一定値となってい るのに対して, 飽和状態ではそれに大きく影響を受けてい る事がわかる.このことから、予測関数は単一の関数で表 現される構造ではなく, 飽和状態前後で異なる関数を用い ることが妥当であると考えられる.加えて,干渉源が存在 するチャネル cinf と移動先のチャネル cnew の差 (すなわち チャネル間距離)毎に基準点の位置が異なり、飽和状態に おける影響の度合いも異なることが観測できる. 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 う関数について、チャネル間距離毎に、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している. 結果的 に構築された f_D および f_T は, $sat(t(c_{inf}), s(c_{inf}), t(c_{cur}))$ という分類器を用いた以下の式3で表現される.分類器 sat は新たなチャネル c_{new} において,現在 c_{cur} にて AP が観測している自身のトラフィックが飽和状態を引き起こ すがどうかを判別する2値の分類器である.

$$f_{\rm D}(c_{\rm new}, c_{\rm inf}, t(c_{\rm inf}), s(c_{\rm inf}), t(c_{\rm cur})) = \begin{cases} 0 & (\text{if } |c_{\rm new} - c_{\rm inf}| > 3 \\ \text{or } \neg sat(t(c_{\rm inf}), s(c_{\rm inf}), t(c_{\rm cur}))) \\ + u_1 \log(t(c_{\rm inf}) + t(c_{\rm cur})) \\ + u_2 \cdot t(c_{\rm inf}) \\ + u_3 \cdot s(c_{\rm inf}) \\ + u_4 \cdot t(c_{\rm cur}) & (\text{elsif } c_{\rm new} == c_{\rm inf}) \end{cases}$$
$$= \begin{cases} v_0 \\ + v_1 \cdot t(c_{\rm inf}) \\ + v_2 \cdot s(c_{\rm inf}) \\ + v_2 \cdot s(c_{\rm inf}) \\ + v_3 \cdot t(c_{\rm cur}) \\ + v_4 \cdot t(c_{\rm inf}) \cdot s(c_{\rm inf}) \\ + v_5 \cdot s(c_{\rm inf}) \cdot t(c_{\rm cur}) \\ + v_6 \cdot t(c_{\rm inf}) \cdot t(c_{\rm cur}) \\ + v_7 \cdot t(c_{\rm inf}) \cdot s(c_{\rm inf}) \cdot t(c_{\rm cur}) \end{pmatrix} (\text{otherwise}) \end{cases}$$
(3)

1 番目の関数は, チャネル c_{new} とチャネル c_{inf} との距 離が離れすぎており干渉による影響が全く存在しないと考 えられた場合もしくはチャネル c_{new} において飽和状態が 発生しないと判断された場合の関数である. 飽和状態にあ る場合, 観測された干渉源 AP におけるトラフィックに影 響を受けない. 2.4GHz 帯 Wi-Fi における論理チャネルで は, 4 つ離れたチャネルとも周波数的重複が存在するが,



図2 飽和状態の基準点の定義 (遅延時間)

予備実験の結果から,現実的にはチャネル *c*_{new} とチャネ ル *c*_{inf} の差が3より大きい場合は影響が全く存在しない ものとして扱ってもよいことがわかっている.

飽和状態が発生し観測値が通信品質に大きく影響すると 想定される場合について,干渉源となる AP の c_{inf} と c_{new} が同じチャネルである場合は,対数曲線を含む 2 番目の回 帰関数を使用する.同一チャネルで全てのフレームのやり 取りがなされる場合,t(c_{inf})で表現される干渉トラフィッ クとt(c_{cur})で表現される自トラフィックの両方が同じチャ ネルを利用することとなる.つまり,これらのトラフィッ クの総和が増加するにつれて,CSMA/CA に基づくシス テムは周波数帯を共有している事による必然的な通信品質 の低下が顕著に現れる.

最後に、上記に示した2つのどちらでもない場合、つま り、飽和状態が発生すると予測されるが、干渉源 AP の チャネル cinf と切り替え先のチャネル cnew の差が 1,2 も しくは3となる場合、全ての観測値の協調作用を表す交 互作用項を含むような3番目の回帰関数を用いる.この 時、図2で見たように、チャネル cnew とチャネル cinf の 差に応じて観測値による通信品質への影響の様子が異なる ため、異なる回帰関数を構築している.

まず,分類器 sat を得るために, SVM に基づく機械 学習を導入した.シミュレーションによって得た,10,000 ケースを超える訓練用データセットのそれぞれのデータサ ンプルに対して,前に述べた遅延時間による基準値による 'saturated' もしくは'unsaturated' のラベル付けを行った. その後,(t(c_{inf}), s(c_{inf}), t(c_{cur}),label)からなるベクトル を訓練データとして入力し SVM 分類器の学習を行ってい る.結果として得られた SVM 分類器を直接 sat 関数とし て用いている.

次に,飽和状態になった場合における通信品質を予測す る回帰関数を構築する.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.

表22番目の関数の係数

Model			coefficients		
	u_0	u_1	u_2	u_3	u_4
$f_{\rm D}$	10.08839	11.33052	-6.43820	-0.200706	-9.13417
$f_{\rm T}$	-0.091064	-1.581287	0.489509	0.109054	0.712960

表 3 f_D における 3 番目の関数の係数

Channel				coeffi	cients			
Distance	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 4 f_T における 3 番目の関数の係数

Channel				coefficie	nts			
Distance	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

このサブセットに対して,チャネル cnew とチャネル cinf 間の距離に応じた重回帰分析を適用することで,式(3)の 不明なパラメータである, $u_i \ge v_j$ ($0 \le i \le 4, 0 \le j \le 7$) を決定している.これによって得られたパラメータを表 2. 表3および表4にまとめる.表3,表4における値0は, ある回帰関数において,通信品質である遅延時間やフレー ム到達率に対しその項による影響がないことを示している. これは、重回帰分析のモデル選択に用いられる AIC (赤池 情報量基準)という指標に基づいて判定を行っている.

4. 予測関数の精度

構築した予測関数である fD および fT 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. 我々 は干渉データセットの作成時と同様に表1にある各パラ メータの設定値にしたがって, 無作為に 2,592 ケースの 追加シナリオを用意した. ここで、訓練用データと評価用 データに重複が存在しないようにそれぞれのデータセット を用意している.

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 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}| = 0, 1, 2$ 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, チャネル間距離 0 の時の sat という最悪の場合でも判 定誤差の割合は 2.0% であることが示されており、平均誤 り率も 1.2% となっていることから, 誤差は十分に小さな 値であることがわかる.

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捉えら 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(R²)を 参照する. R² の値は 1.0 に近付くほど良いとされる. 各 関数に対して算出した R² をまとめた結果を表6に示す. 表に示した通り、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

表 5 チャネル間距離 |c_{new} – c_{inf}| 毎の分類器 sat の出力 (a) 0 (b) 1

	() -										
	Т	F			Т	F					
Т	372	9		Т	357	4					
F	4	263	4	283							
	(c) 2				(d) 3						
		_	ſ		_						

	Т	F		Т	F
Т	323	3	Т	271	1
F	3	319	F	4	372

表 6 チャネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ 毎の f_{D} および f_{T} の決定係数

Channel Distance	Co. of I	Det. (R^2)
	$f_{ m D}$	f_{T}
0	0.8215	0.9815
1	0.7906	0.7520
2	0.8463	0.8161
3	0.8306	0.8796

表 7 チャネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ 毎の f_{D} と f_{T} の平均二乗誤差

Channel Distance	Ave. Mean Square Error									
	$f_{\rm D}$ (sec.)	$f_{\rm T}$ (ratio)								
0	0.1759	0.0178								
1	1.1545	0.1055								
2	0.9894	0.0897								
3	1.1358	0.0879								

振る舞いをよく捉えることができているとわかる.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 ルに対して,回帰関数による予測を行った.図3と図4に 真値を昇順に並べて、真値とその予測値をプロットしてい る. 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捉えられていることがわかる. 表7に回帰関数の予測値とシミュレーションによって実測 した真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ネル間距離が 0 の時であることが 確認できる.他のチャネル間距離の場合,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 均二乗誤差は最悪の場合でも 10% 程度である. MAC フ レームのパッシブモニタリングのみを用いていることを考 慮すると、これらの誤差値は妥当であり、どのような AP にも容易に実装可能であり軽量な予測関数であるという点 で付加価値のある関数である.

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





図 4 チャネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ 毎の f_{T} と真値の比較

成できるチャ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の地理情報が利用可能であるため, これと既設のWi-Fi APの設置位置および稼働チャネル, 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 [4,5] を利用し取得 している. 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ーによる AP か らのビーコン観測データをクラウドサーバーに集約すると 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5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, 200m × 200m 程度の範囲を切り 出し、スマートフォンユーザー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 るチャネルの情報を利用している.また,設置した Wi-Fi AP のトラフィックの設定パラメータを決めるため,図6 に示すように大阪駅周辺計 10 箇所を対象に, AirPcap を 用いたトラフィック実測を行った. この測定では各チャネ ル5分間のフレームモニタリングを実施しており、これか ら得た平均トラフィック量 (Mbps) を、シミュレータ上の *iperf-udp-rate* の値として設定している.



図 5 大阪市 Wi-Fi 電波マップを用いたシナリオ構築(シナリオ 1)

構築した3つの評価環境を図7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200m×200mの環 境を設計した.図中の赤色ノードが AP,青色ノードがそ のクライアント,橙色ノードがフレーム観測用ノードをそ れぞれ表している.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 している.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.また,各 AP のデータレートは,予測関数構築時 に利用した表1と同様のものを用いる.

5.2 隣接する複数チャネルからの影響の定量化

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,



図 6 AirPcap を用いたトラフィック実測

表 8	複数チ	ヤネルシ	ミュレー	ショ	ンの設定
-----	-----	------	------	----	------

Parameter Valu	les
Interference APs - Target AP Distance 100r	n
L7 traffic (Interference APs) 3Mb	ops
L7 traffic (Target AP) 9Mb	ops
IEEE802.11g Data Rate 9Mb	pps (BPSK $3/4$)
Channels c _{new}	$= 6, c_{\inf} \in \{6,7,8,9\}$

構築した都市評価環境や現実世界での提案手法の適用を考 えた場合,2.4 GHz 帯の周波数割当てにおける周波数重複 を考慮すると,前後に隣接する複数チャネルからの影響を 複合的に捉える必要がある.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 ようとすると,設定パラメータの個数および設定値数の増 加により,組み合わ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 ル毎の予測値の組み合わせによる定量化を試みる.

複数チャネル影響の定量化のため、あるチャネル c から チャネル間距離3以下となるチャネルサブセットの中から 2つのチャネルを選択し、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がそれぞれ 1 組ずつ稼働し ているシミュレーションシナリオを用意した. それぞれの シミュレーション設定は表8に示す.対象 AP で観測され た遅延時間をシミュレーション結果として図8に示す.複 数チャネルからの影響を考慮する場合, チャネル間距離が 近い方の影響を強く受けることが確認できる. また, チャ ネル間距離が遠い方の影響も多少は受けるが、チャネル間 距離が離れるに従って弱い影響となることが確認できた. これらの知見から、cnew から見たときに、複数チャネルか らの影響があるとされる場合には、単一チャネル毎の予測 関数の出力値を (|c_{inf} - c_{new}|+1)² に反比例する重み付け 和によって定量化することとした。このシミュレーション 実験では、重み付け和によって得られた出力値と遅延時間 の真値の相関係数は 0.97 となっており、十分に複数チャ ネルからの影響を追従できていることを確認している.

5.3 提案手法の性能評価結果

用意した都市環境シナリオ(図7)で提案手法の性能評 価実験を実施した.対象 AP とそのクライアントは同じ条 件下でチャネル1から13まで変化させながら通信を行う

ものとし、予測関数の出力値を相対的に比較して得られた 最も通信品質の高いと想定されるチャネルが、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 チャネルと一致しているかを確認することで評価実験とし ている.都市環境シナリオを用いた評価結果を図9に示 す.実測された遅延時間を棒グラフで表しており、各シナ リオにおける最良のチャネルは遅延時間が最も低い赤色で 示されたチャネルであり、それぞれチャネル 9、チャネル 12, チャネル7となった.また,提案手法の出力値に基づ く予測においても、チャネル9、チャネル12、チャネル7 がそれぞれ最良であると判断された.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ネルを予測することが可能であ ることが確認できた.加えて、全チャネルにわたる遅延時 間のトレンドも予測関数の出力値が追従していることを確 認することができ、相対的に良好なチャネルサブセットの 選定などに有効に機能すると考えられる.

6. チャネル制御の有効性評価

提案手法を用いた自律チャネル制御を実施することでシ ナリオ全体として高い通信品質に到達可能であるかを有効 性評価実験によって検証する.

図10に評価環境を示す.この評価環境は図7のシナリ オ1をもとに設計しており、車載 Wi-Fi を搭載した道路上 をランダムに移動する車両(黄色ノード)を追加すること で作成した.各車両の車載 Wi-Fi の初期設置位置および稼 働チャネルはランダムに設定しており、CBR アプリケー ションの cbr-tarffic-bps によって 2Mbps の固定レートで トラフィック要求があるものとする. この移動型 Wi-Fi に よって対象 AP 付近における干渉状態が変動することで, 通信品質が最良となるチャネルが時々刻々と変化するシナ リオとなっている.シミュレーション時間は 60 秒として おり、初期のアソシエーション処理や対象 AP の初期稼働 チャネル決定のためのフレームモニタリングの必要性を考 慮し,評価実験としては後半50秒のみを利用する.提案 手法は、一過性の干渉状態変動による頻繁なチャネル切り 替えを避けるため、10秒に1度予測関数を用いた最良な チャネル予測を実施し、その結果にしたがってチャネル切 り替えを行うものとする. このため,対象 AP において 5 回のチャネル切り替え機会があり、このチャネル切り替え によって予測関数が大局的な干渉状態の変動を追従するこ とができるのかを確認し、また、その結果として、提案手 法を用いたチャネル制御によるスループットの上昇によっ て提案手法の有効性評価とする.

提案手法によるチャネル予測の結果を図 11 に示す.図 11 では、シナリオを 1 秒毎のスロットに区切り、各スロッ トにおいて、シミュレーションによって観測された最も スループットが高くなったチャネルを真値として OCS



図 7 都市環境シナリオ



図8 複数チャネル影響の定量化

(Optimal Channel Sequence) と表している. このシナリ オはシナリオ1をもとに設計しているため,図9の(a)で 確認できるように、チャネル2、チャネル9、チャネル13 がスループットの最も高いチャネルとして選出されている ことが確認された.これに対し,提案手法を用いたチャネ ル予測においてもチャネル2およびチャネル9を選択でき ていることから、相対的に通信品質の良好なチャネルを予 測することができていることが確認できる. また, OCS が チャネル2やチャネル9となっている多くの場合において, 提案手法は正確にチャネル予測ができていることも確認す ることができた. 一方で,図11中でOCSの大半がチャネ ル9となっているにも関わらず, チャネル2で対象 AP を 稼働させてしまっている部分も確認されているが、これは チャネル切り替えの間隔を10秒に1度と絶対時間で固定 してしまっているためであり,提案手法による最適な切り 替えタイミングを見極めることで解決することができると 考えているが、今後の課題とする.

提案手法を用いたチャネル制御によるスループットに関 する結果を図 12 に示す.図 12 の棒グラフで示されるス ループットは 50 秒間の全シナリオを通して得られた平均 スループットである. Average はチャネル切り替え機能を 持たない対象 AP が,ある単一チャネルをランダムに決定 し,シナリオ中稼働し続けた時のスループットの期待値で ある. Average と提案手法を比較すると,スループットが 約 1.75 倍となることを確認することができ,提案手法に よるチャネル予測とチャネル切り替えは有用であるといえ る. また,OCS と比較した場合においても,非常に近いス ループットを実現できていることから,提案手法は正確な チャネル予測ができていることを確認した.

7. 現在の取り組み

7.1 チャネル利用傾向情報の予測への応用

図6に示した AirPcap を用いたトラフィック実測の結 果,特定のチャネルに AP が集中する傾向が見受けられ た. 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することで各地 点, 各チャネルで稼働している AP 数を取得している. 各 チャネルに対する 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,図13に示す default (チャネル 1,2 に集中), coordinated (チャネル 1, 6, 11 に 集中), uncoordinated (分散), という 3 種類の分布が確認さ れた. 初期設定のまま設置が行なわれている場合は default が, 商業ビル内といった管理者が存在するような場合は coordinated が, 屋外テラスなどで非強調的な動作が予想 される場合は uncoordinated 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.加えて、近年普及が著しいモバイルルータに 代表される移動性端末を、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し,移動性端末の往来が多い場 所や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ネ ル予測に適用することで、提案手法の高度化を狙っている.





図 10 有効性評価環境

7.2 プロトタイプの実装

提案手法への入力パラメータの取得のため使用するフ レームモニタリング機能およびチャネル通信品質予測手法 の実装を備えた自律チャネル制御 AP (高機能 AP)のプ ロトタイプ実装を行っている.既存の Wi-Fi モジュール を備える Linux 小型機器をベースとすることで,低コス トでの実現可能性も示すことを考えており,図 14 に示す Scenargie Comm Node と呼ばれる端末をベースに開発を 進めている.現在,用意したフレームモニタリング機能で 研究室の環境における Wi-Fi 利用状況の計測を進めてお り, IPERF アプリケーションを用いたスループット測定 によるチャネル品質測定も進行中である.

8. まとめ

本研究では、Wi-Fi AP における通信品質予測に基づく 干渉回避を目的とした自律 Wi-Fi チャネル制御手法の提 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、2.4GHz 帯 Wi-Fi において、対象とする AP において MAC フレームモニタリングを実施することで チャネル状況を把握し、これを入力として、チャネル切り

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.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10%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ネルの予 測および全チャネルにわたる通信品質の傾向を予測するこ とが可能であることを確認している.続く有効性評価実験 においては、提案した予測関数の出力値に基づくチャネル 制御を実施した結果, 対象 AP のスループットがランダム にチャネルを選択した場合の期待値と比較して約 1.75 倍 となることを示した.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP17J05148, JP15H02690 ならびに JP26220001 の助成を受けたものです.

参考文献

- 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. of the 13th Int. Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (MobiQuitous 2016), pp. 143–150 (2016).
- [3] Kajita, S., Yamaguchi, H., Higashino, T., Umehara,

	15																																																	
time slot	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	3 4	1	5 6	5 7	7 8	9
OCS	13	2	2	2	9	9	2	9	2	9	2	2	2	2	2	13	2	2	2	2	2	9	2	9	9	9	9	9	9	9	9	9	2	9	9	9	9	9	9	9	2	2	2	9	2	2	9	9	9	2
Proposed 2											2	2										2										9										9								
10s									+																							×	0	CS	5 =	= (Dp	tir	na	al (Ch	nar	۱n	el	S	eq	u	en	ce	

図 11 提案手法によるチャネル予測結果



図 12 実験結果 (スループット)



図 13 観測された 3 種類の AP 分布(縦軸:割合,横軸:チャネル)



🗵 14 Scenargie Comm Node

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. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob* 2014), pp. 642–647 (2014).

[4] Wi-Fi Scan Map of Osaka City: available from (

http://map.wifibigdata.org).

- [5] 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. of IFIP Networking 2017 (Networking2017)* (2017). (in press).
- [6] AirPcap: Riverbed, http://www.riverbed.com/.
- [7] Mishra, A., Shrivastava, V., Agrawal, D., Banerjee, S. and Ganguly, S.: Distributed channel management in uncoordinated wireless environments, *Proc. of ACM 12th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2006)*, pp. 170–181 (2006).
- [8] Akella, A., Judd, G., Seshan, S. and Steenkiste, P.: Selfmanagement in Chaotic Wireless Deployments, Proc. of ACM 11th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2005), pp. 185–199 (2005).
- [9] Mhatre, V., Papagiannaki, K. and Baccelli, F.: Interference Mitigation Through Power Control in High Density 802.11 WLANs, Proc. of 26th IEEE Int. Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2007), pp. 535–543 (2007).
- [10] 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. of 26th IEEE Int. Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2007), pp. 1451– 1459 (2007).
- [11] Aguayo, D., Bicket, J., Biswas, S., Judd, G. and Morris, R.: Link-level Measurements from an 802.11b Mesh Network, Proc. of ACM 2004 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM 2004), pp. 121–132 (2004).
- [12] Malone, D., Clifford, P. and Leith, D.: MAC Layer Channel Quality Measurement in 802.11, *Communications Letters*, *IEEE*, Vol. 11, No. 2, pp. 143–145 (2007).
- [13] Rayanchu, S., Patro, A. and Banerjee, S.: Airshark: detecting non-WiFi RF devices using commodity WiFi hardware, Proc. of 2011 Internet Measurement Conference (IMC 2011), pp. 137–154 (2011).
- [14] Space-Time Engineering, LLC: Scenargie, http://www. spacetime-eng.com/.