

都市実環境観測データに基づく Wi-Fi通信性能予測手法の評価

梶田 宗吾¹ 天野 辰哉¹ 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹ 浦山 博史² 高井 峰生^{1,3}

概要: 無線 LAN 技術の発達に伴い, 都市部における Wi-Fi を利用した様々なサービスの重要性が増している. しかし, 特に都市部における Wi-Fi 過密化がさらに加速することによる相互干渉の深刻化が懸念されており, サービスへ与える干渉影響が無視できないといった問題がある. 本研究では, こうした Wi-Fi 過密環境において干渉回避によるための Wi-Fi 通信性能予測手法の提案と評価を行う. 提案手法では, 対象とする基地局とそのクライアントが送受信する IEEE802.11 MAC フレームを観測することで得られる干渉情報, ならびに自クライアントの現在のトラフィック量を入力とし, 切り替え後の自クライアントのスループットと遅延を推定する予測関数を設計している. この予測関数のため, 高精度ネットワークシミュレータ *Scenargie* を用いて, 計 10,000 シナリオ以上のシミュレーションを実施して訓練データとした. また, それらに加えて約 2,000 のシナリオを生成してこれらをテストデータとし, 予測関数の精度を評価している. その結果, スループットに対する予測値の平均二乗誤差が 10% 以下となることを示している. 加えて, 大阪梅田において, 干渉環境センシングを実施し, 実際の都市環境情報に基づくシミュレーション性能評価も実施している. その結果, 平均二乗誤差が 6.95% となることを示している.

Evaluation of Algorithm for Estimating Wi-Fi Performance Based on Wi-Fi Measurement in Urban Areas

Shugo KAJITA¹ Tatsuya AMANO¹ Hirozumi YAMAGUCHI¹ Teruo HIGASHINO¹
Hirofumi URAYAMA² Mineo TAKAI^{1,3}

1. はじめに

東京オリンピック・パラリンピック開催を 2020 年に控え, 外国人観光客の増加が続いている. 外国人観光客は Wi-Fi を利用する傾向にあり, 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 月に公表した. ソフトバンクが全国 40 万のアクセスポイントを訪日外国人向けに提供す

るなど, パブリックスペースにおける Wi-Fi 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. 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通情報などを Wi-Fi 通信を用いて路側機間で共有し, 車両へ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.

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 住友電気工業 (株)
Sumitomo Electric Industries, LTD.
³ カリフォルニア大学ロサンゼルス校
University of California, Los Angeles

一方で、例えば図1のように、人口集中都市の中心部ではオフィスの集中、屋外用 Wi-Fi 基地局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 基地局数と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、IEEE802.11ax 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 IEEE802.11a/g/n など既存アーキテクチャの範疇で、各基地局の周波数再利用を自律的に効率化させることを目標に、干渉環境センシングのコンセプトに基づく基地局チャンネル選択により過密干渉を制御する技術を開発している [2]。この手法では、高精度シミュレーションと機械学習をベースに、Wi-Fi の各チャンネルにおける IEEE802.11MAC フレームの観測から各 Wi-Fi 基地局における被干渉レベルと通信性能を予測する関数を設計しており、各チャンネルのフレームセンシングにより、最も高い品質を提供可能と予想されるチャンネルを示唆することができる。

本研究では、干渉源となる近隣のアクセスポイントで送受信される IEEE802.11 MAC フレームの観測および、自クライアントのトラフィック情報のみに基づいて、アクセスポイントがチャンネルを移動した場合に想定される遅延およびスループットを予測する関数を設計する。より具体的には、他のアクセスポイントのトラフィック情報 (トラフィック量、信号強度とその使用チャンネル) および切り替え先のチャンネルである c における自身のクライアントのトラフィック情報 (予測される自身のトラフィック量) が与えられた時、そのアクセスポイントがチャンネル c に移動した場合に予想される通信品質 (遅延とスループット) を推定する予測関数を提案している。この予測関数はチャンネル c がアクセスポイントでのチャンネル切り替えの結果、帯域占有率について、飽和状態になるか否かをまず分類する。これは飽和状態とそうでない場合では、スループットや遅延のトレンドが異なるためである。次に、それぞれの場合において異なる回帰関数を導入し、適切な予測が行えるように工夫している。この予測関数の構築のため、10,000 ケース以上のシミュレーションシナリオを用意し、実施したシミュレーションに対して SVM を用いた分類および重回帰分析を適用している。

予測関数の妥当性を示すため、約 2,000 シナリオのシミュレーションからテスト用データを生成し評価を行った。その結果、帯域占有度合いの分類誤りは高々

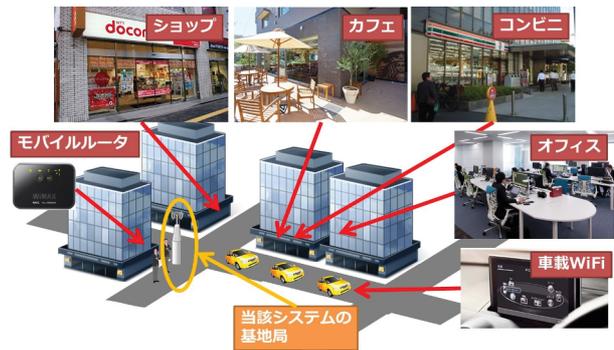


図 1 都市部における Wi-Fi

2.0% であり、加えて遅延およびスループットの真値と予測関数による予測値の平均二乗誤差がそれぞれ 1.2 秒以下、11% 以内となることを確認している。また、予測関数をより具体的な都市環境において評価するため、大阪梅田において、USB 無線 LAN プロトコラライザ *AirPcap* [3] を用いた干渉環境センシングを実施した。干渉環境センシングは、計 6 地点 (カフェ、モール、駅にて各 2 地点ずつ) で行っており、チャンネル毎に観測された基地局数とクライアント数、平均トラフィック量および平均 RSSI の値に基づきシミュレーションシナリオを設計、構築を行なった。このシミュレーションシナリオを用いた評価においても、平均二乗誤差が 6.95% となることを確認している。

2. 関連研究

協調が期待できない自律環境におけるアクセスポイントの Wi-Fi チャン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ンネルホッピングは、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。しかしながら、チャンネルホッピングは頻繁にチャンネル切り替えを行うために、ある一定のオーバー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ー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 [4] 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。このようなアプローチがこれまで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ンネル状態推定が必須となる。

過密な Wi-Fi アクセスポイント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 [5] では、Wi-Fi アクセスポイントが密集する環境において、多くのアクセスポイント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、アクセスポイント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 [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アクセスポイント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 [7] では、複数のアクセスポイント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アクセスポイント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、[6,7] 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性能影響モデル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ンネルの品質推定などにしばしば用いられるが、文献 [8] 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 [9] 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 [10] 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。

これらに対し、我々は文献 [11] において、様々な Wi-Fi システムが混在する都市部において、同一チャンネルおよび近接チャンネルから被る干渉の影響を、チャンネル間干渉を考慮した上で、定量的かつチャンネル相対的に数値化することを目指している。干渉源アクセスポイントがどのチャンネルを利用しているかおよびそのチャンネルをどの程度占有しているのか、これに加えて RSSI を IEEE802.11 のフレーム監視により統計化し、干渉データセットの各データサンプルに対して重回帰分析を実施することで数値化関数を構築している。しかし、この関数ではチャンネル切り替え後の自身のトラフィックを考慮した遅延やスループット推定が実現できておらず、チャンネル切り替えによって得られる通信性能の向上がどの程度であるかを判断することができないため、自律的にチャンネル切り替えを行いながら稼働するアクセスポイントに活用することができない。本研究

において、チャンネル切り替え後の通信性能を推定することが可能とすることで、対象とするアクセスポイントにおいてチャンネル切り替えを行なうべきかどうかの判断が可能になるという極めて重要な利点がある。

3. 予測関数

3.1 問題の定式化

AP を対象とする IEEE802.11g のアクセスポイントとし、 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 チャンネルセット (C とする) 中の c_{cur} を現在使用しているとす。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他の干渉源となるアクセスポイント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ンネル k について求める；(i) 時間的なチャンネル使用率 (もしくは単にチャンネル使用率) 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 [11] 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。

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

平均ビットレート ($\text{ave_bitrate}(k)$) は観測チャンネル 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。 $q(k)$ は観測チャンネル 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 20μ 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 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ンネル使用率を示す。 $s(k)$ は以下の式で表される。

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

$\text{ave_rssi}(k)$ は、観測チャンネル 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 RSS 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、

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

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	$c_{\text{new}} = 6, c_{\text{inf}} \in \{6, 7, 8, 9\}$

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ンネル c_{cur} から切り替え先チャンネル c_{new} および観測値である $t(c_{\text{inf}})$, $s(c_{\text{inf}})$, $t(c_{\text{cur}})$ を入力として、第 2 層における遅延を予測する予測関数である $f_D(c_{\text{new}}, t(c_{\text{inf}}), s(c_{\text{inf}}), t(c_{\text{cur}}))$ と同じく第 2 層におけるスループットを予測する予測関数である $f_T(c_{\text{new}}, t(c_{\text{inf}}), s(c_{\text{inf}}), t(c_{\text{cur}}))$ という 2 つの関数を構築している。 AP においてチャンネル c_{inf} における IEEE802.11 MAC フレームとその RSS 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

予測精度の高い f_D と f_T の構築のため、本研究では文献 [11] の基本方針は踏襲するものの、観測値である $t(c_{\text{inf}})$, $s(c_{\text{inf}})$ および $t(c_{\text{cur}})$ に応じて ST の通信品質がどのように影響を受けるかを明らかにした上で関数の構築を行うため、新たに干渉データセットを作成している。

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 [12] を用いている。 *Scenargie* は物理層（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） = 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から経験的に定義する。この妥当性を示すため、基準点前後の遅延および

スループットの変化の様子を図 2 および図 3 に示す。非飽和状態では、遅延とスループット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ンネル c_{inf} と移動先のチャンネル c_{new} の差（すなわちチャンネル間距離）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とスループット予測を行う関数について、チャンネル間距離毎に、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、 $\text{sat}(t(c_{\text{inf}}), s(c_{\text{inf}}), t(c_{\text{cur}}))$ という分類器を用いた以下の式で表現される。分類器 sat は新たなチャンネル 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。

$$f_D(c_{\text{new}}, t(c_{\text{inf}}), s(c_{\text{inf}}), t(c_{\text{cur}})) = \begin{cases} t(c_{\text{cur}}) & (\text{if } |c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}| > 3 \\ & \text{or } \neg \text{sat}(t(c_{\text{inf}}), s(c_{\text{inf}}), t(c_{\text{cur}}))) \\ u_0 \\ +u_1 \log(t(c_{\text{inf}}) + t(c_{\text{cur}})) \\ +u_2 \cdot t(c_{\text{inf}}) \\ +u_3 \cdot s(c_{\text{inf}}) \\ +u_4 \cdot t(c_{\text{cur}}) & (\text{elseif } c_{\text{new}} == c_{\text{inf}}) \\ v_0 \\ +v_1 \cdot t(c_{\text{inf}}) \\ +v_2 \cdot s(c_{\text{inf}}) \\ +v_3 \cdot t(c_{\text{cur}}) \\ +v_4 \cdot t(c_{\text{inf}}) \cdot s(c_{\text{inf}}) \\ +v_5 \cdot s(c_{\text{inf}}) \cdot t(c_{\text{cur}}) \\ +v_6 \cdot t(c_{\text{inf}}) \cdot t(c_{\text{cur}}) \\ +v_7 \cdot t(c_{\text{inf}}) \cdot s(c_{\text{inf}}) \cdot t(c_{\text{cur}}) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

1 番目の関数は、チャンネル c_{new} とチャンネル 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ンネル 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、観測された干渉源アクセスポイントにおけるトラフィックに影響を受けない。2.4GHz 帯 Wi-Fi における論理チャンネルでは、4 つ離れたチャンネルとも周波数的重複が存在するが、文献 [11] におけ

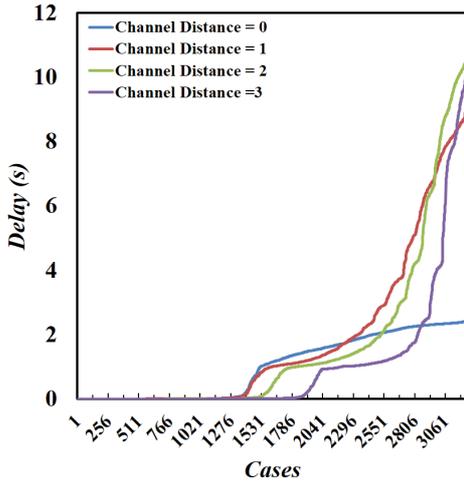


図 2 飽和状態の基準点 (遅延)

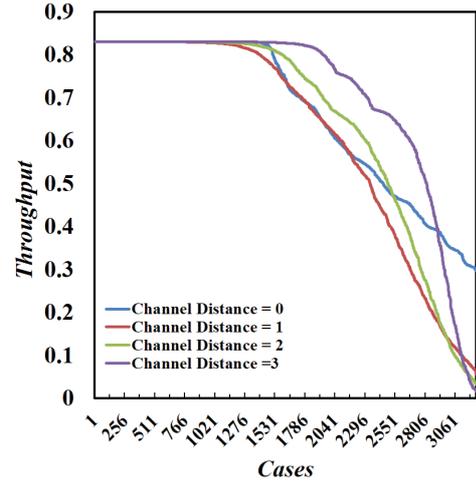


図 3 飽和状態の基準点 (スループット)

る予備実験の結果から、現実的にはチャンネル c_{new} とチャンネル 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、干渉源となるアクセスポイントの c_{inf} と c_{new} が同じチャンネルである場合は、対数曲線を含む 2 番目の回帰関数を使用する。同一チャン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ン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、干渉源アクセスポイントのチャンネル c_{inf} と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、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, 図 3 で見たように、チャンネル c_{new} とチャンネル c_{inf} 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

表 2 2 番目の関数の係数

Model	coefficients				
	u_0	u_1	u_2	u_3	u_4
f_D	10.08839	11.33052	-6.43820	-0.200706	-9.13417
f_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 Distance	coefficients							
	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 Distance	coefficients							
	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

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。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) の不明なパラメータである、 u_i と v_j ($0 \leq i \leq 4, 0 \leq j \leq 7$) 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やスループット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. 干渉環境センシング

4.1 干渉環境センシングの概要

シミュレーションにおける Wi-Fi 過密環境の再現のため、干渉環境センシングを行った。前述のとおり、図 4 に示す USB 無線 LAN プロトコルアナライザである *AirPcap Nx* を用いて干渉環境センシングを実施し

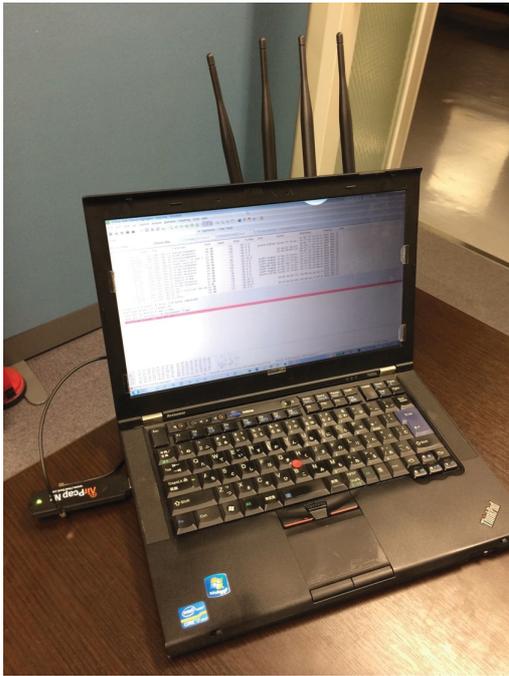


図 4 AirPcap

ている。これを用いることにより、FCS(Frame Check Sequence)を含む全ての 802.11 パケットキャプチャを行い、各チャンネルにおける基地局数とクライアント数、単位時間あたりのトラフィック量および RSSI の時間平均の値を取得した。用意した AirPcap の数の都合上、同時にセンシングできるチャンネルは 6 チャンネルであるため、2.4GHz 帯 Wi-Fi の 13 の論理チャンネルの全てのセンシングには計 3 回の実施が必要である。本研究では、各チャンネルに対して 5 分間ずつパケットキャプチャによる干渉環境センシングを実施しているため、各測定場所では 15 分間ずつセンシングを行なっている。

4.2 大阪梅田におけるセンシング結果

各チャンネルに対して 5 分間ずつパケットキャプチャによる干渉環境センシングを実施した。干渉環境センシングを実施したスポットを図 5 に示す。代表的な都市環境として大阪梅田における干渉環境センシングを実施した。モバイルルータやスマートフォンによるテザリングが見受けられ、かつ公衆の Wi-Fi スポットとして機能していると予想されるカフェ、ショッピングモール、駅という 3 種類のシーンを想定し、それぞれのシーンに関してスポットを変えて 2 箇所ずつセンシングを実施している。

基地局数(図 6)は FCS において、データに損失が無いと判断された Beacon フレームの送信元および Probe Response フレームの送信元の MAC アドレスを収集することで求めている。図 6 から都市部では数多くの基地局が密集していることがわかる。また、どのスポッ



図 5 干渉環境センシング実施場所

トにおける観測でもチャンネル 1, 6, 11 における基地局数が多いことが確認された。特に、付近での歩行者の往来が多いようなスポットではその傾向が顕著となり観測された基地局数も増加した。これは、歩行者の保持するモバイルルータやテザリング端末などが要因の一つであると考えられる。クライアント数(図 7)は Probe Response フレームの宛先 MAC アドレスを収集することで求めた。こちらについても、基地局数と同様の傾向が見られた。また、全てのフレームに対してフレーム長をカウントすることで求めた単位時間あたりのトラフィック量は図 8 に示す。この中でも、FCS においてエラーのないパケットであるものを抽出した結果を図 9 に示している。さらに、これらの情報からエラーのないパケット受信の確率を算出し、図 10 に示す。直感的に、基地局数やクライアント数が増加するとトラフィック量が増加すると思われるが図 8 と図 6 を見比べてもその相関は確認することができなかった。一方で、図 9 や図 10 を見ると、基地局数やクライアント数と同様にチャンネル 1, 6, 11 では値が大きくなるという傾向が確認された。これより、チャンネル 1, 6, 11 で稼働する基地局やクライアント数が増加するにつれてこれらのチャンネル上でやり取りされるトラフィックがその周辺のチャンネルに干渉影響を与えていると考えることが出来る。最後に、図 11 に RSSI の時間平均値を示す。以上の干渉環境センシングの結果を踏まえ、次章では都市環境をシミュレーション上に設計性能評価を行う。

5. 性能評価

5.1 予測関数の精度

ここでは、構築した予測関数である f_D および f_T による遅延およびスループット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

表 5 チャンネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ 毎の分類器 *sat* の出力

(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 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ 毎の f_D および f_T の決定係数

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

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、チャンネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|=0, 1, 2$ 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、チャンネル間距離 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% であることがわかる。平均誤り率は 1.2% であり、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 (R^2) を参照する。 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とスループットの振る舞いをよく捉えることができているとわかる。特に、 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|=0$ 時のスループットを推定するモデルが最も良く、0.98 を達成している。

最後に、遅延とスループット予測の精度を示す。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推定されたデータサンプルに対して、重回帰関数による予測を行った。表 7 に重回帰関数の予測値とシミュレーションによって実

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

Channel Distance	Ave. Mean Square 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

測した真値の平均二乗誤差をまとめた。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 の時であることが確認できる。他のチャンネル間距離の場合、遅延の推定値の平均二乗誤差は約 1 秒、スループットの推定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、どのようなアクセスポイントにも容易に実装可能であり軽量の予測関数であるという点で付加価値のある関数である。視覚化を目的として、図 12 と図 13 に真値を昇順に並べて、真値とその推定値をプロットしている。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。

5.2 センシングデータを用いた評価

大阪梅田における干渉環境センシング（図 6 から図 11）により得られた基地局数、クライアント数、トラフィックおよび RSSI に基づきシミュレーション環境を設計構築し、性能評価を行なった。

基地局やクライアントがチャンネル 1,6,11 に集中しており、その他のチャンネルでは干渉影響が確認されていることから、東京オリンピックといった大型イベント開催時に追加設置される基地局もこれらのチャンネルを利用する可能性が高く、この基地局を利用するクライアントも同様にこれらのチャンネルを利用すると仮定し、干渉源となる基地局とそのクライアントはチャンネル 1,6,11 で稼働させた。また、今後、外国人観光客の増加による案内コンテンツ配送といったトラフィックは、これらのチャンネルで稼働する基地局数やクライアント数に対し、正の相関関係を持つと予想される。このことから、干渉源基地局およびそのクライアントのトラフィックは、干渉環境センシングによって観測した基地局数やクライアント数に基づいて設定した。干渉源基地局のトラフィックは *iperf-udp-rate* によって設定している。また、干渉環境センシングによって観測した RSSI の時間平均値をもとに、対象基地局と干渉源基地局の距離により設定した。

対象基地局とそのクライアントはチャンネル 1 から 13 まで順に切り替えていき、予測関数の出力値とシミュレーションで実測された値を比較し評価としている。

表 8 都市シナリオを用いた予測結果

Channel	Groundtruth	Function
1	69.4	64.3
2	86.3	80.5
3	93.3	84.3
4	97.3	85.3
5	96.9	93.2
6	89.6	82.75
7	97.6	93.2
8	91.9	86.0
9	84.1	85.2
10	81.0	83.3
11	68.7	54.1
12	81.3	83.3
13	87.7	88.4

本研究では、図 6 で見られるような複数の基地局群を代表する仮想的な 1 基の基地局を用意しており、複数基地局、複数クライアントによる競合数が通信性能へ与える影響は今後の課題とする。また、提案手法の予測関数では複数の異なるチャンネルからの被干渉は考慮できていないため、全てのチャンネルに干渉源基地局が存在する場合、予測関数の出力値が複数存在することになる。複数の異なるチャンネルからの被干渉の影響に対する予測関数の拡張は今後の課題とするが、本研究では、予測関数により被干渉の影響が大きいと判断される出力値を選択するものとしている。

都市シナリオにおいてスループットに関する評価結果を表 8 に示す。シミュレーションによって実測されたスループットと予測関数で求めた値の平均二乗誤差は 6.95% となり、予測関数が実環境を模したシミュレーションにおいても十分に通信性能を予測できているといえる。

6. まとめと今後の課題

本研究では、2.4GHz 帯 Wi-Fi において、現在稼働中のアクセスポイントが、自身のクライアントのトラフィックを考慮した上で良好なチャンネルを選択するための遅延とスループットの予測関数の提案をした。この予測関数は対象とするアクセスポイントが現在使用しているチャンネルから切り替え先チャンネルへ移動する際に利用することを想定しており、干渉源となるアクセスポイントのトラフィックと RSS および自身のトラフィックを入力として、切り替え先チャンネルにおける遅延とスループットを実際に切り替えることなく予測する。この予測関数を構築するため、10,000 を超える干渉データセットを作成し、SVM に基づく分類器および重回帰分析を適用することで、チャンネル状態に合わせた回帰関数の選択を実現し、高精度な通信品質の予測を行っている。交差検証を用いた予測関数の妥当性評価により、予測関数は 10% 未満の誤差を達成していることを示した。また、この予測関数は実環境を模した都市シミュレーションにおいても、スループットの平均二乗誤差が 6.95% となることを確認している。

本研究では、複数の異なるチャンネルを使用した干渉源アクセスポイントからの影響による通信品質（スループットおよび遅延）の予測関数の構築を目指している。例えば、対象とするチャンネルを h として、干渉源アクセスポイントがチャンネル $K+1$ および $K+2$ に存在している場合、2 チャンネルからの影響を複合して捉える必要がある。しかし、現在の方針に基づいてこのように複合した場合に対する予測関数を構築するためには、あらゆる組み合わせを考慮したシナリオ数を用意して関数を構築する必要がある。そのため、効率的に組み合わせシナリオ数を削減するような予測関数の構築方針についての検討を行っている。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 15H02690 および 26220001 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., Yamaguchi, H., Higashino, T., Urayama, H., Yamada, M. and Takai, M.: Throughput and Delay Estimator for 2.4GHz WiFi APs: A Machine Learning-Based Approach, *Proc. 8th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC 2015)*, pp. 223–226 (2015).
- [3] AirPcap: Riverbed, <http://www.riverbed.com/>.
- [4] 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).
- [5] Akella, A., Judd, G., Seshan, S. and Steenkiste, P.: Self-management in Chaotic Wireless Deployments, *Proc. of ACM 11th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2005)*, pp. 185–199 (2005).
- [6] 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).
- [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. of 26th IEEE Int. Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp. 1451–1459 (2007).
- [8] 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).
- [9] 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).

- [10] 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).
- [11] 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, *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2014 IEEE 10th International Conference on*, pp. 642–647 (2014).
- [12] Space-Time Engineering, LLC: Scenargie, <http://www.spacetime-eng.com/>.

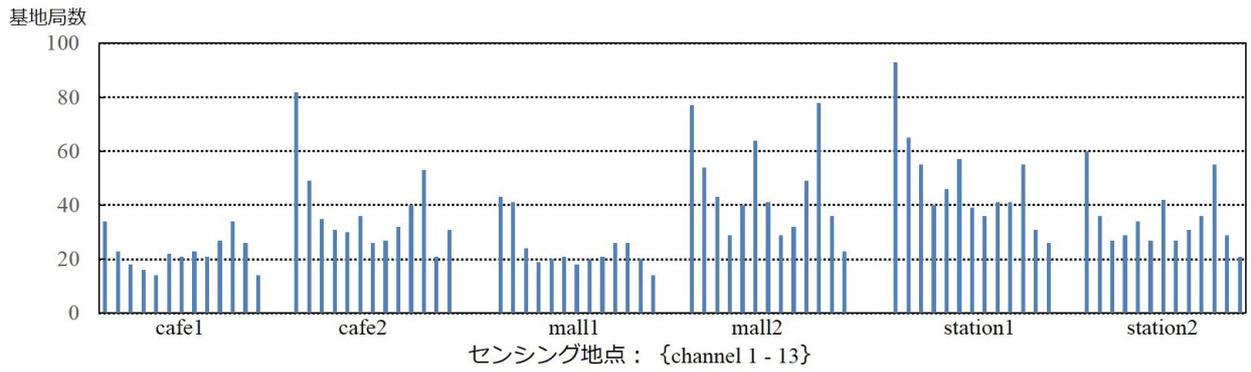


図 6 各スポットで観測された基地局数

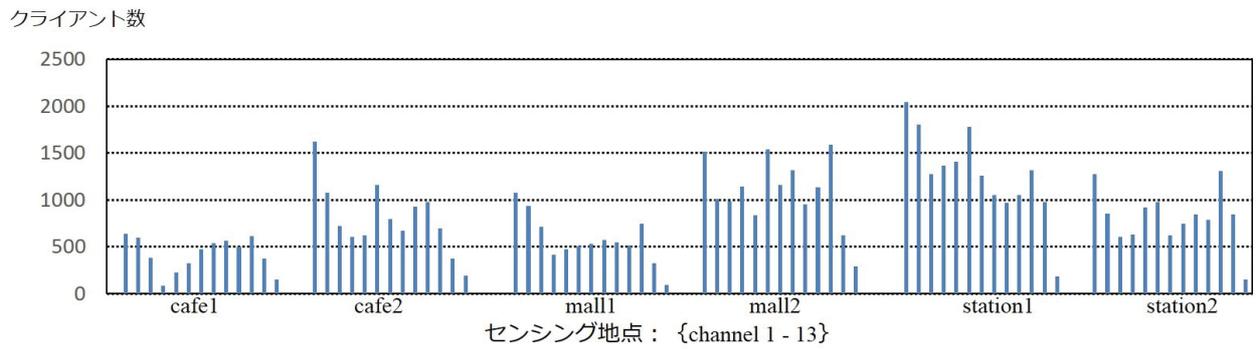


図 7 各スポットで観測されたクライアント数

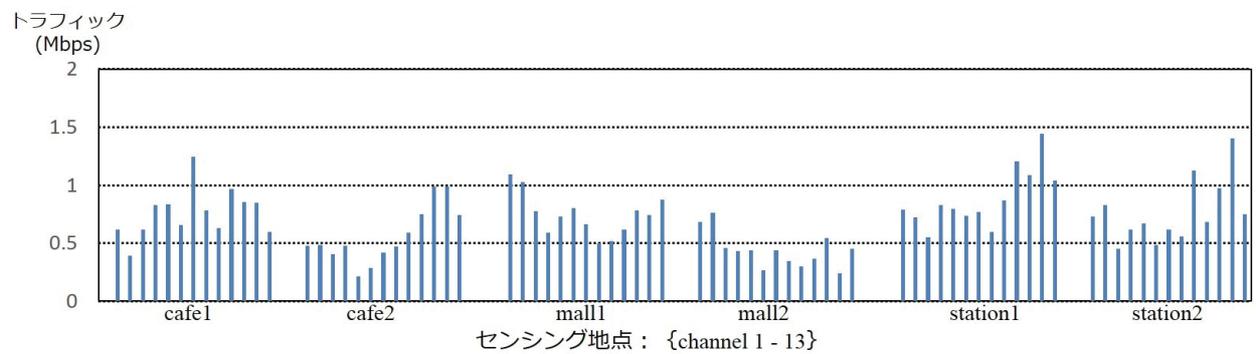


図 8 各スポットで観測されたトラフィック量 (全パケット)

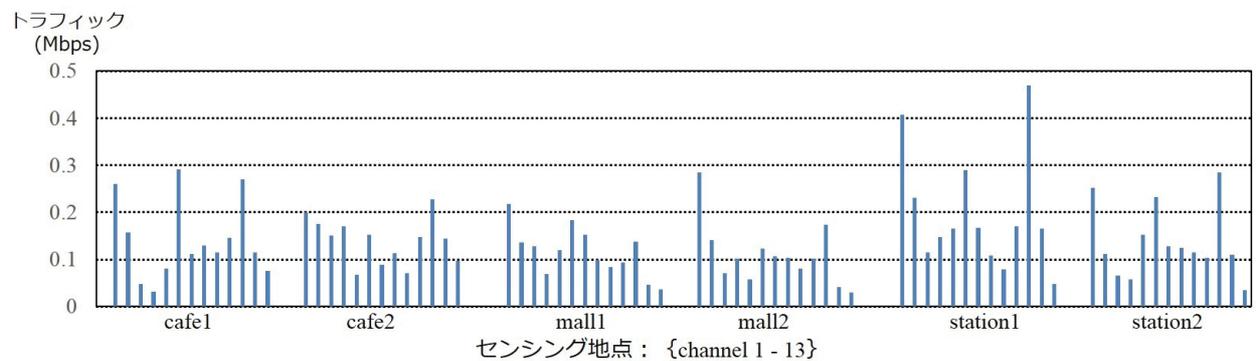


図 9 各スポットで観測されたトラフィック量 (エラーのないパケットのみ)

エラーのない
パケット受信率(%)

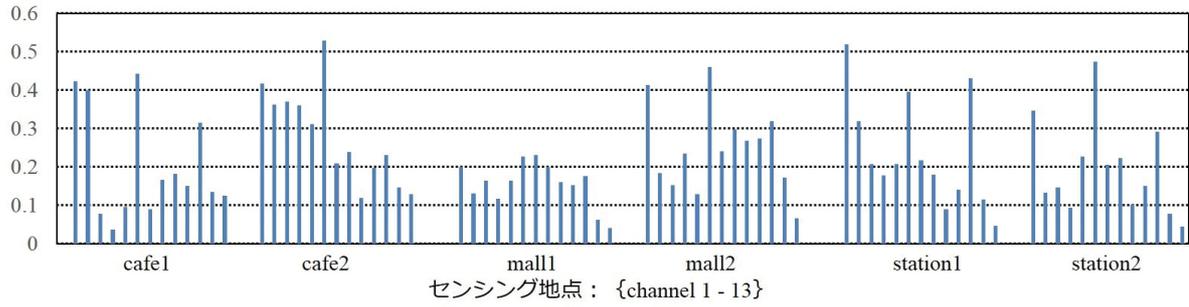


図 10 エラーのないパケット受信の確率

RSSI
(dBm)

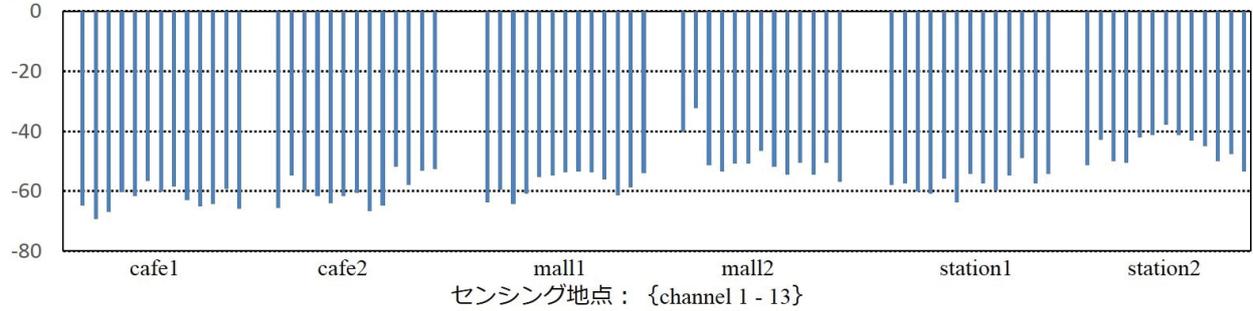


図 11 各スポットで観測された RSSI

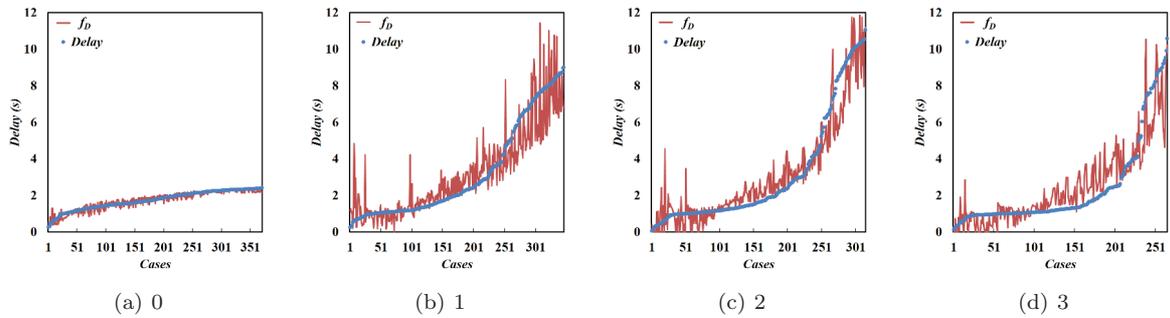


図 12 チャンネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ 毎の f_D と真値の比較

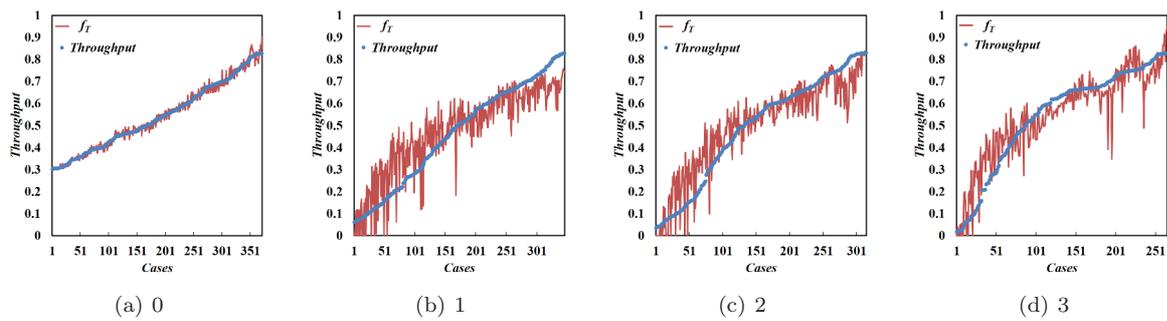


図 13 チャンネル間距離 $|c_{\text{new}} - c_{\text{inf}}|$ 毎の f_T と真値の比較