

令和7年度 卒業論文

エンタープライズ無線LAN環境における通信品質
改善のためのユーザ行動支援手法

電気通信大学 情報理工学域

I類 コンピュータサイエンスプログラム

学籍番号 2210182

氏名 上川雅弘

指導教員 矢俊志

令和8年1月30日

概要

本論文では、エンタープライズ無線 LAN 環境における通信品質改善を目的とした、ユーザ行動支援手法に関する研究について述べる。近年、インターネット環境の質は、業務効率や生産性のみならず、顧客満足度やサービスの信頼性にも大きな影響を及ぼす要因となっている。企業や大学など、多数の利用者が同時にアクセスするエンタープライズ無線 LAN 環境においては、利用者全員に対して安定した高品質な通信体験を提供することが求められている。

無線 LAN 環境では、多数のアクセスポイント (AP) を広範囲に配置し、利用者の移動や利用状況に応じて柔軟にネットワークを提供する必要がある。従来は、ネットワーク管理者側が AP の設置位置最適化やチャネル割り当て、トラフィック制御といった手法により通信品質の改善を図ってきた。しかし、建物構造による電波遮蔽や反射、管理外 AP による干渉、利用者の予測困難な移動行動など、管理者の制御が及ばない要因も多く、通信品質のばらつきや一時的な接続不良が依然として発生している。このため、管理者主体のアプローチに加え、利用者側の行動を考慮した新たな通信品質改善手法が必要とされている。

本研究では、AP と利用者端末との距離やユーザ数に加えて、AP が使用するチャネルの使用率を評価指標として用いることで、より実環境に即した通信品質評価を行う。この評価手法により、利用者に対して最小限の移動による適切な AP 選択を促すユーザ行動支援手法を提案する。提案手法の有効性を検証するため、ネットワークシミュレータ ns-3 を用いたシミュレーション評価を行った。その結果、提案手法を適用した場合、利用者がランダムに移動した場合と比較して、システム全体のスループットが平均して向上することを確認した。また、通信品質の改善と同時に、利用者の移動距離を抑制できることが示され、提案手法がエンタープライズ無線 LAN 環境において有効性のある通信品質改善手法であることを示した。

目次

1 はじめに

1.1 研究の背景

現代社会において、インターネットは電気や水道と同様に、日常生活や社会活動を支える重要な基盤となっている。スマートフォンやタブレット、ノートパソコンなどのモバイル端末の普及により、人々がインターネットへ接続する機会は大幅に増加している。特に、公共空間における無線 LAN (Wi-Fi) 環境の整備は急速に進展しており、仕事、学習、娯楽、情報収集など、あらゆる場面でネットワーク接続をすることが一般的になっている。特に、カフェやレストラン、図書館、商業施設、イベント会場、空港などの公共空間においては、無線 LAN 環境の有無やその使いやすさが利用者にとって重要な評価基準の一つとなっている。観光庁が訪日外国人向けに実施したアンケート調査（2025）[1]によれば、訪日外国人が旅行中に不便を感じた項目の一つに「無料公衆無線 LAN 環境の不足」が挙げられており、空港や商業施設における環境整備は、単なる利便性向上に留まらず、施設全体の評価に直結する重要な要素となっている。そのため、Wi-Fi 設備は多くの施設において、必要な設備として認識されるようになっている。

このような背景のもと、多くの施設運営者は無線 LAN 環境の整備に積極的に取り組んできた。具体的には、アクセスポイントの増設、高性能な通信機器の導入、より広帯域なインターネット回線の契約など、設備面での投資が進められている[2]。しかし、こうした設備投資にもかかわらず、実際の利用現場では「Wi-Fi が繋がりにくい」「通信速度が遅い」「接続が頻繁に切断される」といった不満が利用者から寄せられることがある。特に、多数の利用者が同時にネットワークを利用する状況、例えば大規模なイベント会場や講演会場、混雑時のカフェなどにおいては、通信品質の低下が顕著に現れることが多い。

現在、これらの問題に対応するため、ネットワーク管理者はさまざまな技術的対策を講じている。

帯域制御による通信量の調整、QoS (Quality of Service) 設定による通信の優先制御、チャネル割り当ての最適化、電波干渉の原因となる機器の特定や除去、アクセスポイント間での動的な負荷分散などがその代表例である[3]。さらに、トラフィックの常時監視やログ解析、異常検知システムの導入など、運用管理の自動化や効率化も進められてきた。しかしながら、これらの管理者側の取り組みにもかかわらず、通信品質の問題が完全に解消されているとは言い難い。

その要因の一つとして、従来の対策が主にネットワーク機器やインフラ側の制御に注目しており、実際にネットワークを利用するユーザの行動が十分に考慮されてこなかった点が挙げられる。例えば、特定の場所に利用者が集中することによるアクセスポイントへの負荷の偏り、バックグラウンドで動作するアプリケーションによる不要な通信、複数の利用者が同時に大容量データの通信を行うことによる混雑など、利用者の行動はネットワーク全体の通信品質に大きな影響を与えている。これらの問題を単に技術的な課題として捉えるのではなく、通信システムを構成する重要な要素として「利用者」を位置づけ、利用者の行動も含めて通信環境全体を改善する視点が必要であると考えられる。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、従来のネットワーク管理手法に加えて、利用者の行動に着目することで、エンタープライズ無線 LAN 環境における通信品質の改善を実現することである。すなわち、人間を通信環境の単なる利用者としてではなく、通信品質に影響を与える存在として捉え、利用者に対して移動や接続選択等の適切な行動を促し、通信の品質を改善することを目標とする。

これまでの通信品質改善手法は、ネットワーク機器の高性能化や設定の最適化といった、管理者側による技術的対策に大きく依存してきた。しかし、いかに高性能な機器を導入したとしても、利用者が特定のアクセスポイント周辺に集中したり、必要以上に通信帯域を消費したりする状況では、期待される通信品質を維持することは難しい。このような問題意識から、本研究では利用者の行動を通信環境改善の一要素として積極的に取り入れる。

具体的には、利用者の行動を適切に誘導することで、以下の三つの効果を目指す。

第一に、空間的な負荷分散である。

利用者が特定のアクセスポイントに集中することを避け、比較的空いているエリアへの移動を促すことで、各アクセスポイントの負荷を均等にし、全体として安定した通信品質を実現する。

第二に、各利用者の通信利用の効率化である。利用者ごとに必要とする通信量は異なるため、各利用者が自身の要求を満たすために必要十分な通信帯域を利用するよう促すことで、ネットワーク全体の帯域利用効率の向上を図る。

第三に、利用者の行動負担の軽減である。無計画な移動や頻繁な場所の変更は、ネットワークの状態を不安定にする可能性がある。そのため、利用者に対して最小限の移動や操作で済むような行動を提示することで、通信品質の安定化と利用者の負担軽減の両立を目指す。利用者の負担が小さい手法であれば、継続的に利用されやすいという利点も期待できる。

本研究では、これらの行動変化を実現するための方法として、利用者への通信状況の提示や推奨行動の通知などの仕組みを想定する。そして、提案手法の有効性を検証するため、シミュレーション環境を用いた評価を行い、通信品質の変化を定量的に比較・分析する。本研究を通じて、利用者の行動を考慮した通信環境改善手法が、エンタープライズ無線 LAN 環境において有効であることを示す。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。第 2 章では、本研究に関連する背景知識について述べる。第 3 章で関連研究について述べる。第 4 章で提案手法について述べる。第 5 章で評価について述べる。第 6 章で本論文をまとめるとする。

2 背景知識

2.1 無線 LAN の基礎技術 [4],[5]

無線 LAN(Wireless Local Area Network) は, IEEE 802.11 標準規格に基づく無線通信技術により構築されるネットワークである。システムは主にアクセスポイント (AP: Access Point) とクライアント端末から構成される。AP が 2.4GHz 帯または 5GHz 帯 (IEEE 802.11ax 以降では 6GHz 帯も利用可能) の電波を用いてクライアントとの双方向通信を実現する。近年の規格発展により, IEEE 802.11ac(Wi-Fi 5) では最大 6.9Gbps, IEEE 802.11ax(Wi-Fi 6) では最大 9.6Gbps の理論スループットが達成されている。しかし, 実環境では後述する様々な要因により, 実効スループットは理論値を大きく下回ることが知られている。

2.2 無線 LAN の通信方式 [5]

無線 LAN は, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance(CSMA/CA) 方式を採用している。この方式では, 端末が通信を開始する前にチャネルの状態を監視し, 他の端末が通信中でないことを確認してから送信を行う。もしチャネルが使用中であれば, ランダムなバックオフ時間を待機した後に再度チャネルの状態を確認する。これにより, 複数の端末が同時に通信を試みた際の衝突を回避し, 効率的なチャネル利用を実現している。さらに, Acknowledgment(ACK) フレームを用いた確認応答機能により, 送信データの正確な受信を保証している。受信側は正常にデータを受信した場合に ACK フレームを送信し, 送信側はこれを受信することでデータの到達を確認する。ACK が受信されない場合, 送信側は再送を行うことで信頼性の高い通信を実現している。

2.3 無線 LAN のチャネルと周波数帯域 [5]

無線 LAN は, 2.4GHz 帯と 5GHz 帯, 6GHz 帯の周波数帯域を利用して通信を行う。2.4GHz 帯は, 電波の到達距離が長く, 障害物に対する透過性が高い一方で, 他の無線機器(電子レンジ, Bluetooth 機器など)との干渉が発生しやすい [6]。一方, 5GHz 帯は, より広い帯域幅を提供し, 高速な通信が可能であるが, 電波の到達距離が短く, 障害物による減衰が大きいという特性がある。無線 LAN では, 複数のチャネルが定義されており, 各チャネルは特定の周波数範囲を占有する。2.4GHz 帯では, 通常 1~14 チャネルが利用可能であり, 各チャネルは 20MHz の帯域幅を持つ。5GHz 帯では, より多くのチャネルが利用可能であり, 20MHz, 40MHz, 80MHz, 160MHz の帯域幅を持つチャネルが存在する。チャネル選択は, 干渉の回避と通信品質の最適化において重要な役割を果たす。

2.4 無線 LAN における通信品質のパラメータ [5]

無線 LAN 環境における通信品質は、以下の主要なパラメータが存在する。

- **スループット (Throughput)**

単位時間あたりに実際に転送可能なデータ量 (bps) を指す。理論上の最大通信速度（帯域幅）とは異なり、プロトコルのオーバーヘッドやネットワークの混雑状況を加味した実効速度である。この値の低下は、ファイル転送時間の増大や動画の低画質化など、ユーザ体感品質 (QoE:Quality of Experience) の低下に直結する。

- **遅延 (レイテンシ / Latency)**

パケットが送信元から宛先へ到達するまでに要する時間 (ms)。双方向通信においては往復時間 (RTT: Round Trip Time) で評価される。リアルタイム通信において極めて重要であり、この値が増大すると、Web 会議の音声途切れやオンラインゲームの操作遅延など、即時性を要するアプリケーションの品質を損なう。

- **パケット損失率 (Packet Loss Rate)**

送信されたパケットが、輻輳（混雑）やノイズ、伝送路の不安定さによって正常に受信されない割合。損失が発生すると、TCP 等のプロトコルによる再送制御が作動し、結果として遅延の増大や実効スループットの低下を招く。

- **受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator)**

受信した電波の強度を表す指標 (dBm)。値が 0 に近いほど信号が強く、通信可能範囲や接続の安定性を判断する物理的な指標となる。ただし、強度が十分であっても後述する SNR が低い場合は、安定した通信が困難になることがある。

- **信号対雑音比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio)**

所望の信号電力と背景雑音電力の比 (dB)。SNR が高いほど信号がノイズに埋もれずクリアであることを示し、結果としてスループットが向上する。

- **チャネル使用率 (Channel Utilization)**

特定の周波数チャネルが単位時間のうちに占有されている時間の割合 (%). 無線 LAN 等の共有媒体においては、他端末や干渉波による使用率が高いほどスループットの低下か遅延の原因となる。

2.5 チャネル使用率

チャネル使用率は、無線 LAN チャネルが占有されている割合を示す指標であり、通信品質に大きな影響を与える。チャネル使用率は、他の端末による通信が頻繁に発生している

時や、外乱・電波干渉が起こっている時などに高くなり、新たな通信の開始が困難になる。これにより、スループットの低下、遅延の増加、パケットロス率の上昇といった通信品質の劣化が生じる。チャネル使用率は、通常 0% から 100% の範囲で表され、100% に近い値はチャネルがほぼ常に占有されている状態を示す。

チャネル使用率の測定は、無線 LAN 機器や専用の解析ツールを用いて行われる。これらのツールは、チャネルの占有時間を監視し、使用率をリアルタイムで算出する機能を備えている。ネットワーク管理者は、チャネル使用率の情報を活用して、チャネルの最適化や負荷分散の施策を講じることが可能である。チャネル使用率 U_{ch} は、チャネル使用状況を測定できた時間のうち、実際にチャネルが使用されていた時間の割合として定義される。

2.6 AP 密集環境における干渉問題

エンタープライズ無線 LAN 環境では、通信容量の確保やカバレッジの向上を目的として、同一環境内に多数の AP が配置される。しかし、AP が高密度に配置される環境では、隣接チャネル干渉や同一チャネル干渉が発生しやすくなり、通信品質の低下を招く要因となる。

同一チャネル干渉は、複数の AP が同一のチャネルを使用することにより発生し、CS-MA/CA 方式に基づく送信待ち時間の増加を引き起こす。一方、隣接チャネル干渉は、周波数帯域が部分的に重複するチャネルを使用する場合に発生し、パケット誤り率の増加や再送の増大につながる。これらの干渉は、物理的な距離が十分に離れていない AP 間で顕著となり、結果としてスループットや遅延特性に悪影響を及ぼす。

2.7 管理外 AP による影響

近年の無線 LAN 環境では、管理者が設置・管理していない通信機器が通信品質に影響を与えるケースが増加している。具体的には、来訪者が持ち込むモバイルルータやスマートフォンのテザリング機能などが挙げられる。これらの管理外 AP は、既存の無線 LAN システムと同一または隣接するチャネルを使用する場合が多く、予期せぬチャネル使用率の増加を引き起こす。

管理外 AP はネットワーク管理者からは直接制御することができず、その存在や通信状況を正確に把握することが困難である。そのため、AP と端末間の距離や受信信号強度のみを基準とした接続制御では、実際の通信品質を適切に評価できない場合がある。

2.8 AP 選択方式とその課題

無線 LAN における AP 選択は、クライアント端末がどの AP に接続するかを決定する重要なプロセスである。一般的な端末では、受信信号強度 (RSSI) が最も高い AP を選択する方式が広く用いられている。この方式は実装が容易である一方で、AP の混雑状況やチャネル使用率を考慮していないという課題がある。

その結果、多数の端末が特定の AP に集中し、通信品質の低下や負荷の偏りが発生することが知られている。このような問題は、AP の設置間隔が短いエンタープライズ環境において特に顕著であり、RSSI のみを用いた AP 選択の限界を示している。

2.9 ユーザ移動と通信品質の関係

無線 LAN 環境における通信品質は、ユーザ端末の位置に大きく依存する。ユーザが AP に近づくことで受信信号強度や SNR が向上し、高速な変調方式の利用が可能となる。一方で、AP 周辺は多くのユーザが集中しやすく、チャネル使用率の増加によって必ずしも高いスループットが得られるとは限らない。

また、ユーザのわずかな移動によっても、接続 AP や利用チャネルが変化し、通信品質が大きく変動する場合がある。このことから、ユーザの位置情報と無線環境情報を組み合わせて評価することが、通信品質の最適化において重要であるといえる。

2.10 無線 LAN における負荷分散の考え方

無線 LAN 環境では、特定の AP やチャネルに通信負荷が集中することを避けるため、負荷分散が重要な課題となる。従来の負荷分散手法は、主に AP 側での送信制御や接続制限といった管理者主導の手法が中心であった。しかし、これらの手法はリアルタイム性や利用者体感品質の観点から限界がある。

近年では、利用者の行動や接続選択がネットワーク全体の性能に影響を与えるという観点から、ユーザを含めた負荷分散の重要性が指摘されている。このような背景から、ネットワーク側の情報を活用してユーザに適切な行動を促す手法が注目されている。

2.11 シミュレーションツール ns-3[7]

ns-3 は離散事象ネットワークシミュレータであり、インターネットシステム全般の挙動を模擬するためのオープンソースソフトウェアである。本ツールは主に研究および教育目的で設計されており、GNU GPLv2 ライセンスの下で公開されている。ns-3 の基本的な考え方は、実際のネットワークで発生する出来事（イベント）を順序立てて処理し、応答や遅延、通信プロトコルのふるまいを詳細に再現する点にある。

具体的には、ns-3はネットワークノード、プロトコルスタック、通信チャネルといった要素をソフトウェア内部に構築し、イベントスケジューラを用いて各イベントを処理する。また、C++を主言語として使用し、Pythonバイインディングを通じてスクリプト形式でも操作可能な柔軟性を持つ。

Wi-Fiのシミュレーションに関しては、ns-3がIEEE 802.11準拠のモデルを標準で提供しているため、アクセスポイントと端末間の通信や、基本的な物理層・MAC層の挙動を模擬できる。具体的には、インフラストラクチャーモードおよびアドホックモードの双方がサポートされ、802.11a/b/g/nなどの物理層仕様、伝搬損失モデル、EDCAによるQoS拡張などを設定可能である。

このような特性から、Wi-Fiネットワークの性能評価やプロトコル設計、トラフィック挙動の解析といった研究課題において、ns-3は非常に有用なツールである。実ネットワークを構築せずに多様なシナリオを再現できる点は、コストや時間の節約にもつながる。

3 関連研究

無線 LAN 環境の改善に向けた取り組みは数多く報告されている。Ranasinghe ら [8] や Wu[9] らは、各 AP に接続される端末数のロードバランシングに関する手法を提案している。ロードバランシングは無線 LAN 環境を改善するために管理者側で行う対策としては基本的なものである。各 AP に接続される端末の台数をできるだけ均一にすることで、AP ごとの通信負荷を分散し、特定の AP に過度な負荷が集中することを防ぐ。一方でユーザの位置的分布や行動特性を変化させるものではないため、実環境における通信品質の改善効果には限界がある。既製品としても、ユーザの通信に関する QoE を評価・可視化する機能を持つものはあるが、具体的に通信環境を改善する機能としては、AP 配置やチャネル割り当ての最適化にとどまっている。

Rowden らの研究では、電波強度を VR 技術を用いて可視化し、利用者が最適な AP を選択可能とする手法が提案されている [10]。この手法は VR ゴーグル等の専用機器を必要とするため、実環境で利用者に提供する機能としては現実的ではない。現実的な運用環境においては、利用者が自身の端末のみで通信環境を改善するための行動を確認できることが重要な要件となる。

本研究が目指すように、利用者に行動を促すことで、無線 LAN 環境を改善する取り組みもある [11]。Miyata らは、利用者の協調的な移動を考慮した新たな AP 選択手法を提案している。同研究は、各利用者がそれぞれ指定する「移動可能距離」と「許容スループット」を条件とし、無線 LAN システム全体のスループットを最大化するための移動を利用者に促すものである。この手法は、スループットを評価指標として、AP と利用者の距離のみに着目した手法であり、電波干渉や物理的障害物、他利用者数の動的変化といった要因は考慮されていない。また、シミュレーションのみで手法を評価しており、実環境における適用についてはその効果は未解明である。この手法は AP や利用者の位置を特定する方法として AP とは異なるセンサーを多数設置することを想定しており、実環境においてはコスト面での制約が大きい点も課題である。

一方で、無線 LAN 環境の状態を適切に把握し、ユーザへの行動支援に活用するためには、通信品質を定量的に評価する指標が必要となる。この点において、チャネル利用率は無線 LAN の混雑状況や通信品質を直接的に反映する有用な指標である。チャネル利用率に関する研究には Bianchi らによるモデルがある [12]。この研究では理想的な環境を定義した上で、無線 LAN にかかる処理を定式化することで、チャネル利用率に関連するようなパラメータを解析的に求めている。より直接的なチャネル利用率の推定としては、Zhao らによるキャリアセンスに着目した手法がある [13]。Zhao らはチャネルの利用され

ていない IDLE 時間を新たなセンシング手法で推定し、実効的な最大スループットを求める手法を提案した。この手法は他手法に比べて、より実験値に近い値を算出できていることが示されている。端末の情報のみを用いた無線環境の推定としては、Rossi らによる実験がある [14]。Rossi らは特殊機材などを用いず、Linux 向けカスタムドライバを導入することでのみ得られる情報を用いて、無線 LAN 環境の推定を行っている。Remote Access Network (RAN) 分野でも伝送路の状態推定が行われており、Guterman ら [15] による研究がある。RAN スライシングに代表される 5G ネットワークでは、適切なサービス提供を行うため、伝送路の状態とユーザの需要を適切に識別・推定したうえでスケジューリングを行う必要がある。この課題に対して、Guterman らは古典的な統計時系列モデルと機械学習である LSTM を組み合わせた手法を提案している。

4 提案手法

4.1 提案手法の概要

本研究では、エンタープライズ無線 LAN 環境における通信品質の改善を目的として、ネットワーク管理側の制御のみに依存するのではなく、利用者自身の能動的な行動変容を促すことにより、通信環境全体の最適化を図るユーザ行動支援手法を提案する。近年、オフィスビルや大学キャンパスなどのエンタープライズ環境では、無線 LAN が業務や学習を支える基盤インフラとして広く利用されている一方で、利用者数や端末数の増加に伴い、通信品質のばらつきやスループット低下が問題となっている [16]。

従来の無線 LAN 管理における最適化アプローチは、主にアクセスポイント (AP) の設置位置の最適化、チャネル割り当ての調整、送信出力制御といった、管理者主導の技術的施策に焦点が当てられてきた。これらの手法は、静的あるいは準静的な環境を前提とした場合には有効であるものの、実際の運用環境では必ずしも十分な効果を発揮しない場合が多い。

その要因として、建物構造による電波の遮蔽や反射、不特定多数のユーザによる予測困難な移動、さらには来訪者が持ち込むモバイルルータやテザリング端末といった管理者外の通信端末による干渉など、時間的・空間的に変動する要素が挙げられる。これらの動的な要因を、管理者側の制御のみでリアルタイムに把握し、完全に解決することは困難である。

そこで本研究では、通信システムを構成する重要な要素として「ユーザ」に着目し、ネットワーク側が把握可能な環境情報と、ユーザ自身が提供する情報を組み合わせることで、ユーザに対して適切な行動指針を提示する新たなアプローチを検討する。具体的には、ネットワーク管理側から取得可能な情報に基づき、ユーザに対して最適な接続先 AP や、通信品質の向上が期待できる移動先を提示することで、高品質な通信体験の実現を目指す。

提案アルゴリズムの特徴を以下にまとめる。

- AP とユーザ間の距離に加え、チャネル使用率および接続ユーザ数を考慮した AP 選択を行う点
- ユーザの許容移動距離および最低要求スループットを制約条件として明示的に導入している点
- 新規ユーザ単体ではなく、システム全体のスループット最大化を目的としている点

これにより、実環境における電波干渉や負荷の偏りを考慮した、現実的かつ合理的な AP 選択および移動誘導が可能となる。

4.2 提案アルゴリズム

本研究では、エンタープライズ無線 LAN 環境において新たに接続を行う利用者に対し、通信品質の向上を目的として、最適なアクセスポイント (AP) および移動方向を提示するアルゴリズムを提案する。提案手法は、AP と利用者端末の距離に基づいて接続先を決定する従来手法を拡張し、AP が使用しているチャネルの使用率や接続ユーザ数といった無線環境の混雑状況を考慮する点に特徴がある。本研究では、通信品質 (QoE) の評価指標としてスループットを採用し、新規ユーザの接続によってシステム全体のスループットが最大化されることを目的とする。

4.2.1 入力情報と前提条件

提案アルゴリズムは、新規ユーザ u に対して以下の情報が与えられていることを前提とする。また、無線 LAN 環境内に存在する AP の集合を A とし、各 AP $a \in A$ に対して以下の情報が既知であると仮定する。表 1 に入力情報の一覧を示す。なお、スループットの平均値は接続ユーザのスループットの調和平均として計算されるものとする。

表 1: 提案アルゴリズムの入力情報

カテゴリ	パラメータ	説明
ユーザ情報	P_u	現在位置
	d_{th}	許容最大移動距離
	θ_{th}	最低要求スループット
AP 情報	P_a	AP の位置座標
	n_a	接続中のユーザ数
	U_c	使用チャネルの使用率
	θ_a^{before}	接続前の平均スループット

なお、本研究では位置情報の取得方法や入力インターフェースについては議論せず、ユーザが自己申告により現在位置を入力できるものと仮定する。

4.2.2 接続候補 AP の抽出

新規ユーザが移動可能な範囲内に存在する AP のみを接続候補として抽出する。ユーザの移動は移動ベクトル m により表され、移動後のユーザ位置は $P_u - m$ とする。このとき、移動後のユーザと AP a との距離 $d_{u,a}$ は以下の式で定義される。

$$d_{u,a} = |P_a - (P_u - m)| \quad (1)$$

距離 $d_{u,a}$ が許容最大移動距離 d_{th} 以下となる AP の集合を、接続候補 AP 集合 A_{cand} とする。

4.2.3 接続前後のスループット推定

次に、各接続候補 AP に対して、新規ユーザ接続前後のスループットを推定する。AP a に接続されている既存ユーザの平均スループット θ_a^{before} は、接続ユーザのスループットの調和平均として与えられているものとする。

新規ユーザが AP a に接続した場合のスループット $\theta_{a,m}^{after}$ は、AP とユーザ間の距離およびチャネル使用率 U_c を考慮して推定される。このとき、新規ユーザのスループットが最低要求スループット θ_{th} を下回る場合、または移動距離が許容最大移動距離 d_{th} を超える場合には、当該 AP を接続候補から除外する。

4.2.4 評価スコアの算出

残った接続候補 AP に対して、以下の 4 つの評価指標を用いて総合スコアを算出する。

1. 接続後スループットに基づくスループットスコア
2. ユーザと AP の距離に基づく距離スコア
3. AP が使用するチャネルの使用率に基づくチャネル使用率スコア
4. AP に接続されているユーザ数に基づく接続ユーザ数スコア

各スコアは正規化された値として算出され、重み係数 w_i を用いて以下の式により総合スコア $Score(a)$ を計算する。

$$Score(a) = \sum_i w_i \cdot score_i(a) \quad (2)$$

4.2.5 最適 AP および移動ベクトルの決定

提案アルゴリズムでは、総合スコアが最大となる AP を単純に選択するのではなく、総合スコア上位の複数 AP を候補として扱う。その上で、各候補 AP に対して、新規ユーザ接続後のシステム全体のスループットを算出し、これが最大となる AP a^* と移動ベクトル m^* を最終的な出力とする。

システム全体のスループット $\Theta_{a,m}^{after}$ は、以下の式で表される。

$$\Theta_{a,m}^{after} = \theta_{a,m}^{after} + \sum_{i \neq a} \theta_i^{before} \quad (3)$$

以上で述べた提案アルゴリズムを擬似コードとして Algorithm1 にまとめる.

4.3 チャネル使用率の推定

提案アルゴリズムでは、AP 選択の評価指標の一つとしてチャネル使用率を用いる。2.5 節で述べた通り、無線 LAN 環境において、チャネル使用率は AP がどの程度通信に使用されているかを表す重要な指標であり、通信品質やスループットの低下を把握する上で不可欠である。802.11k 規格では、チャネル使用率以外にもいくつかの無線資源管理に関する情報が定義されており、無線 LAN クライアントは、これらの情報を元に最適な AP を選択することができる。

しかしながら、一部の無線 LAN 環境においては、AP の機能・性能やネットワーク構成の制約などの理由から、このチャネル使用率に関する情報が提供されない場合や、取得が困難な場合がある。またエンドユーザーの端末といった改修が憚られる端末においては、特別なドライバなどが導入できない場合も多い。

以上の課題から、提案手法を満足に実装するためには、チャネル使用率を推定する手法が求められる。本説では、このチャネル使用率の推定手法について述べる。無線 LAN 環境において、チャネル使用率に影響を与える要因は様々ある。トラフィック負荷、無線 LAN クライアントの数、AP とクライアントの距離などはその主因となり得るが、これ以外にも多くの要因が想定できる。また、外乱による電波環境の変化などもチャネル使用率に影響を与える。これらすべての要因を抽出し、解析的手法でチャネル使用率推定手法をモデル化することは困難である。そこで本研究では、ネットワークシミュレータを用いて様々なパターンの無線環境をシミュレートし、その結果から、チャネル使用率に影響を与える主要因を分析する。

本研究では、ネットワークシミュレータ ns-3 (Ver. 3.45) [17] を用いて無線 LAN 環境を模擬した。さらに、チャネル使用率に影響を与える主要因と考えられるトラフィック負荷、無線 LAN クライアント数、AP とクライアントの距離などの要因を変化させた場合のチャネル使用率を測定することで、チャネル使用率を推定するうえで重要なパラメータを特定する数値実験を行った。

実験に使用する ns-3 によるシミュレーションの基本構成を図 1 に示す。また、シミュレーションの基本条件は次のとおりである。

- 無線 LAN 規格 IEEE 802.11ax を用いる
- AP は 1 台とし、この AP に複数の無線 LAN クライアントが接続されている

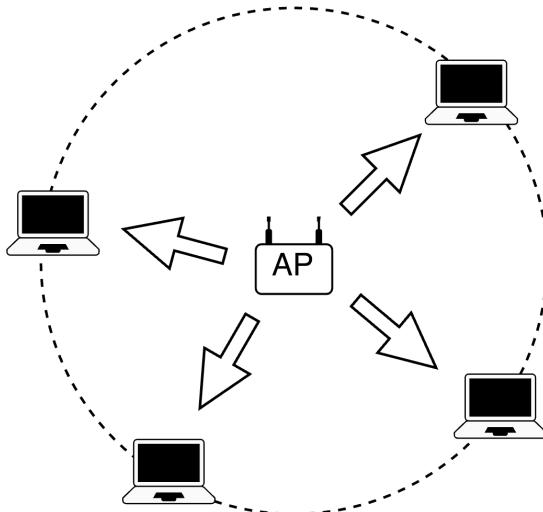


図 1: シミュレーションの基本構成. 図は 4 台の無線 LAN クライアントが接続されている場合を示す.

- AP と各無線 LAN クライアントの距離はすべて同じとする
- トランスポート層には TCP を用いる
- パケットサイズを 1,400 バイトとする
- トラフィック負荷となる通信として, AP からすべての無線 LAN クライアントに対して同時に 10Mbps の負荷が発生する. これはフル HD 動画のストリーミングに相当する負荷である

本節では, チャネル使用率を推定する関数を $U(N, L, R)$ と表記する. ここで, N は AP に接続している無線 LAN クライアント数(台), L は AP から各無線 LAN クライアントに対して発生させるトラフィック負荷(Mbps), R は AP と各無線 LAN クライアント間の平均受信信号強度指標 RSSI(dBm)をそれぞれ表す. 本節では, これらの 3 つの要因がチャネル使用率に大きな影響を与えると仮定し, チャネル使用率推定モデルの構築を試みた. これらの指標は, 実際の無線 LAN 環境においても, AP および無線 LAN クライアントの機能により, 比較的容易に収集可能である.

シミュレーションのパラメーターとしては表 3 を用いる. ここで, 通信距離 D は主に RSSI を変化させることを意図したパラメーターである. シミュレーションにおいて通信距離 D を変化させることで, RSSI の変化を観測する. RSSI は信号強度であり, AP と無線 LAN クライアント間の距離が増加するにつれて悪化する傾向がある. RSSI は値が大きいほど電波受信状況が良好であることを示す.

表 2: シミュレーションパラメーター

パラメーター	値
トラフィック負荷 L (Mbps)	10
無線 LAN クライアント数 N (台)	1, 5, 10, 15, 20
通信距離 D (m)	0, 5, 10, 15, 20

4.3.1 シミュレーション結果

図 2 に、前述の基本構成および基本条件のシミュレーションにおいて、無線 LAN のクライアント数を変化させた場合の、平均 RSSI とチャネル使用率の関係を示す。図 2 は、平均 RSSI とチャネル使用率の関係を示しており、横軸に平均 RSSI (dBm)，縦軸にチャネル使用率 (%) を取っている。一般的に、複数の無線 LAN 機器メーカーの設定ガイドでは、RSSI が-70 dBm 以上の場合を良好、-70～-80 dBm を通常、-80 dBm 以下を不良とする指標が示されている [18, 19]。また、環境差はあるものの、ノイズフロアは概ね-90 dBm 程度と見積もられることが多い。このため、RSSI が-70 dBm 以上であれば、信号対雑音比 (SNR) は 20 dB 以上となり、無線通信において十分な受信品質が確保されている状態であると考えられる。

通信理論において、通信速度はシャノンの定理に基づき、SNR の増加に伴って向上することが知られている。無線 LAN では、SNR に応じて Modulation and Coding Scheme (MCS) が選択され、リンク速度が動的に変化する [20]。MCS は番号が大きくなるほど高次の変調方式および高効率な符号化方式を用いるため、SNR が高い条件下ではデータレートの向上が期待できる。このような特性を踏まえることで、図 2(a), (b) に示す RSSI とチャネル使用率の関係を説明できる。

図 2 より、無線 LAN クライアント数が増加するにつれて、チャネル使用率が高くなる傾向が確認できる。特に、クライアント数が 10 台、15 台、20 台の場合では、RSSI の値に依らず、チャネル使用率はおおむね 80% これは、多数のクライアントが同一の無線チャネルを共有することで、チャネルの帯域がほぼ飽和状態に達しているためと考えられる。

Cisco Systems 社の資料 [21] によれば、実効スループットは以下の経験則で見積もることができる。

$$\text{予想スループット} = \text{データレート} \times 0.7 \quad (4)$$

ここで、図 2 において RSSI が-30 dBm の場合を考えると、SNR と MCS の対応関係 [20] から、802.11ac を参考にすると MCS 9 以上に相当すると推定される。この条件における

802.11ax の 1 空間ストリーム、チャネル幅 20 MHz のデータレートは約 109 Mbps である。このデータレートを複数の端末で共有することを考慮すると、高いチャネル使用率が維持されることは妥当である。

以上より、RSSI が -60 dBm 以上であれば受信電波強度自体は十分に良好であるものの、受信品質の向上が必ずしもチャネル使用率の低下には結びついていないことが分かる。したがって、本シミュレーション条件下では、クライアント数が 10 台以上の場合、端末を AP に近づけて RSSI を改善しても、チャネル使用率の改善効果は限定的であると考えられる。

一方で、無線 LAN クライアント数が 1 台および 5 台の場合には、RSSI の増加に伴いチャネル使用率が低下する傾向が見られる。クライアント数が 5 台の場合は、RSSI の改善に応じてチャネル使用率が緩やかに減少しており、端末位置の調整による一定の改善効果が期待できる。さらに、クライアント数が 1 台の場合には、RSSI の増加に対してチャネル使用率が急激に低下しており、AP に近づけることで大幅なチャネル使用率の改善が可能であると考えられる。

Algorithm 1 提案アルゴリズム

- 1: **Input:** P_u (ユーザ現在位置), d_{th} (最大許容移動距離), θ_{th} (最低要求スループット), A (AP集合)
- 2: **Output:** a^* (選択 AP), m^* (推奨移動ベクトル)

▷ — AP 候補抽出 —

- 3: $A_{cand} \leftarrow \{a \in A \mid \|P_a - P_u\| \leq d_{th}\}$

▷ — 接続可否判定 —

- 4: **for** each $a \in A_{cand}$ **do**
- 5: Compute θ_a^{before} using harmonic mean of existing users
- 6: Estimate $b_{new,a}$ from RSSI at P_u
- 7: Compute $\theta_{a,0}^{after}$ assuming no movement
- 8: Compute $\theta_{new,a,0}$ for the new user
- 9: **if** $\theta_{new,a,0} < \theta_{th}$ **then**
- 10: $A_{cand} \leftarrow A_{cand} \setminus \{a\}$
- 11: **end if**
- 12: **end for**

▷ — スコア計算 —

- 13: **for** each $a \in A_{cand}$ **do**
- 14: Compute $score_{\theta_a}$ from $\theta_{a,0}^{after}$
- 15: Compute $score_{d_{u,a}}$ from $\|P_a - P_u\|$
- 16: Compute $score_{U_c}$ from channel utilization
- 17: Compute $score_{n_a}$ from number of users
- 18: $Score(a) \leftarrow \sum_i w_i \cdot score_i(a)$
- 19: **end for**

▷ — 最終選択 —

- 20: $A'_{cand} \leftarrow \text{top-3 APs by } Score(a)$
 - 21: $\{a^*, m^*\} \leftarrow \arg \max_{a \in A'_{cand}, \|m\| \leq d_{th}} \theta_{a,m}^{after}$
 - 22:  $\{a^*, m^*\}$
-

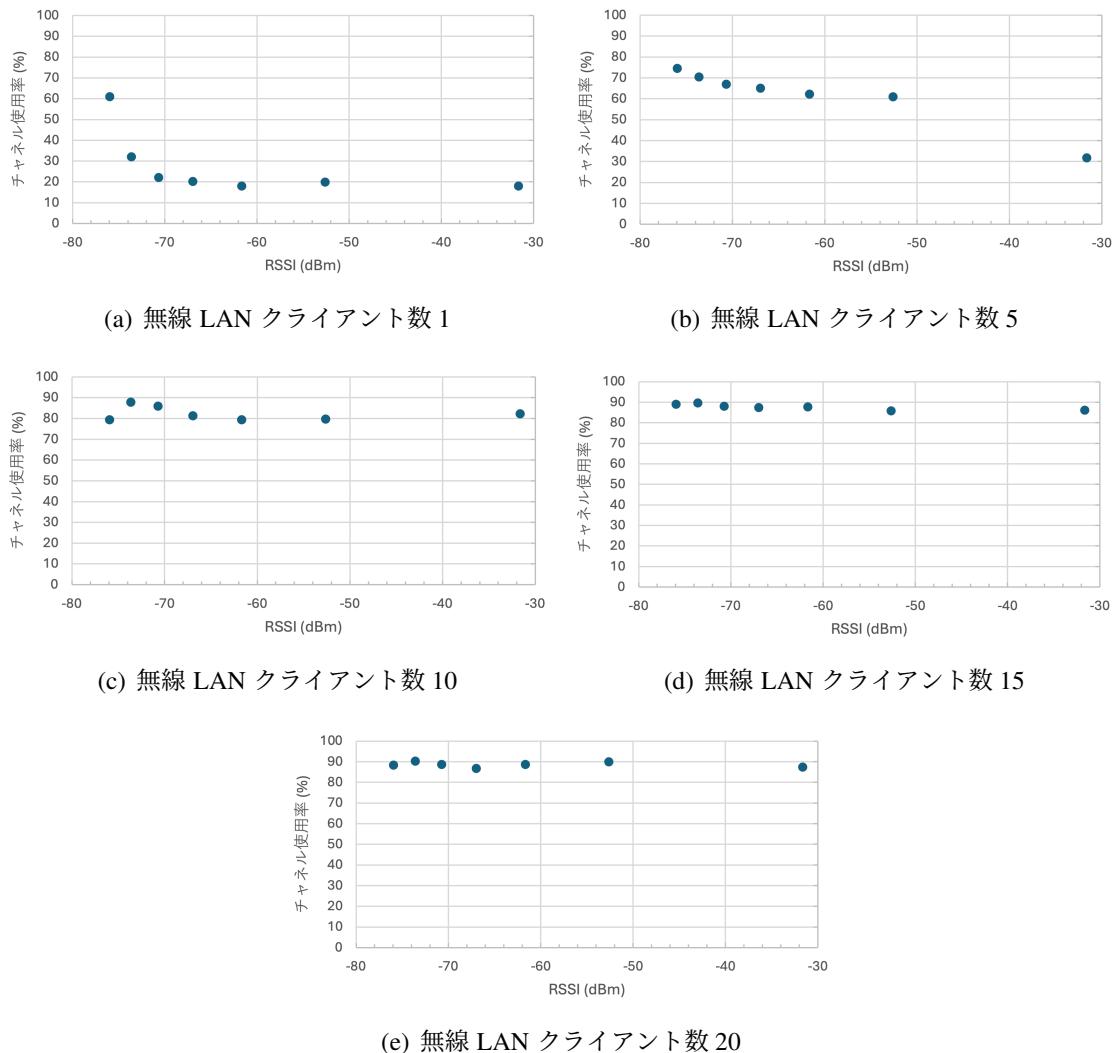


図 2: AP からすべての端末にトラフィック負荷 10Mbps を発生させた場合における平均 RSSI とチャネル使用率の変化の関係。RSSI は AP と端末間の距離に依存する。

5 評価

本章では、提案手法の有効性を検証するために実施したシミュレーション評価について述べる。具体的には、ネットワークシミュレータを用いて無線 LAN 環境を再現し、提案手法に基づいてユーザが移動した場合と、ユーザがランダムに移動した場合とを比較した。

5.1 実験環境

評価には、ネットワークシミュレータ ns-3 (version 3.35) を用いた。無線 LAN の規格としては、エンタープライズ環境で広く利用されている IEEE 802.11ax (2.4GHz 帯) を想定し、一般的な AP をモデル化した。シミュレーションは 1 回あたり 30 秒間とし、各条件について 100 回の試行を行った。評価では、AP 数およびユーザ数が比較的少ない小規模環境と、AP 数およびユーザ数が多い大規模環境の 2 種類のシナリオを設定した。各シナリオにおいて、新規ユーザはランダムな位置に出現し、既存ユーザはシミュレーション開始時点で AP に接続されているものとした。

5.2 評価指標

評価指標としては、以下の 2 点を用いた。

1 つ目は、新規ユーザが移動する前後におけるシステム全体の合計スループットの改善率である。これにより、提案手法が無線 LAN システム全体の通信品質向上に寄与しているかを評価する。

2 つ目は、ユーザごとの移動距離である。提案手法では、ユーザに過度な移動を強いない「消極的移動」を方針としている。そのため、スループットの改善だけでなく、移動距離がどの程度抑制されているかを併せて評価する。

5.3 実験 1：提案アルゴリズムの評価

5.3.1 目的

本実験では、提案手法によって算出された移動先にユーザが移動した場合に、システム全体のスループット改善と移動距離抑制が両立できるかを検証する。特に、環境規模の違いが提案手法の有効性に与える影響を明らかにすることを目的とする。

5.3.2 方法

評価では、提案手法によって算出された移動先にユーザが移動した場合と、ユーザがランダムな方向に移動した場合とを比較対象とした。いずれの場合も、ユーザは事前に設定された移動可能距離の範囲内でのみ移動するものとする。ユーザが最低限満たすべきスループットとして、Web会議が可能な通信品質を想定し、最低許容スループットを30 Mbpsと設定した。各条件について100回の試行を行い、システム全体のスループット改善率およびユーザごとの移動距離を測定した。

5.3.3 結果

図3に小規模環境におけるスループット改善率の比較を示す。提案手法を適用した場

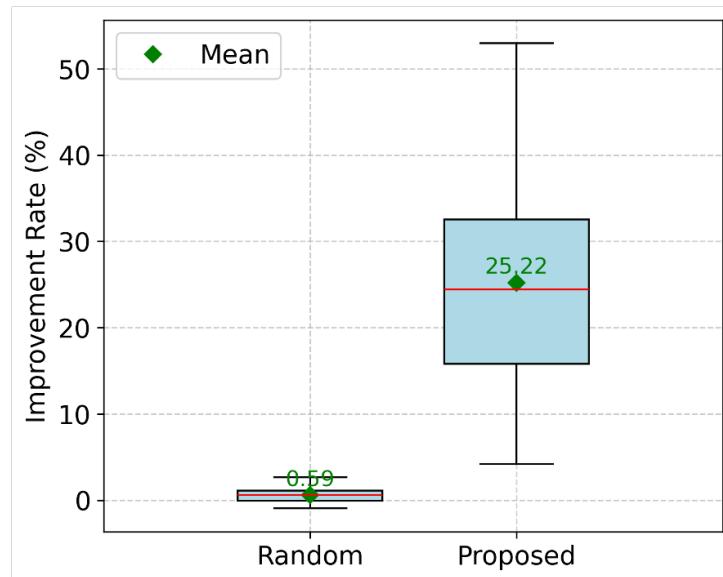


図3: スループット改善率

合、ランダム移動と比較してシステム全体のスループット改善率の平均値が約24.6%高い結果となった。

図4に小規模環境におけるユーザごとの移動距離の分布を示す。提案手法ではユーザの移動が1m以下に抑えられていることが確認できる。ランダム手法では移動距離が0.5 m以下に抑えられるユーザが一定数存在する一方で、最大移動距離近くまで移動するユーザも確認された。これは、提案手法が各ユーザの状況に応じて適切な移動距離を算出していることを示している。

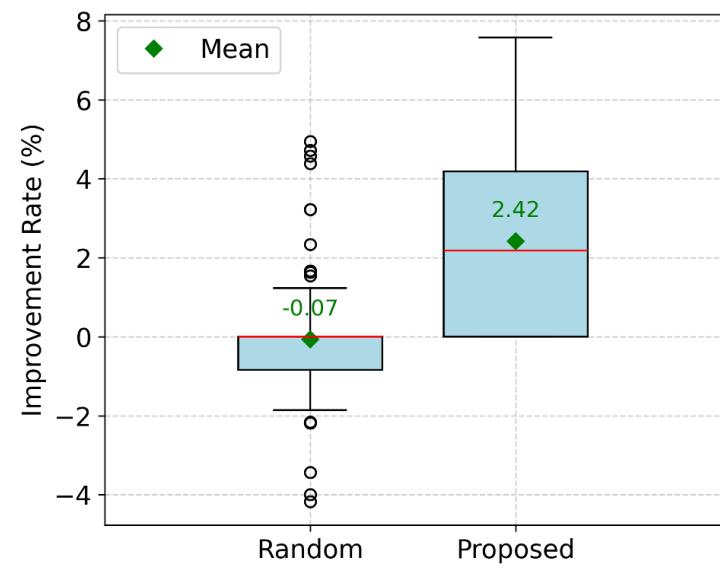


図 4: 移動距離の平均値

5.3.4 考察

評価結果から、提案手法を適用することで、ランダムに移動した場合と比較して、システム全体のスループットを改善できることが確認できた。特に小規模環境では、提案手法による効果が顕著に現れ、スループット改善率が約 24.6% 向上した。これは、ユーザ数が少ない環境では個々のユーザの移動が全体に与える影響が大きく、提案手法によるユーザ行動の適切な誘導が有効に機能したためであると考えられる。一方で、大規模環境ではスループット改善率の差が約 2.5% と小さくなる結果となった。これは、ユーザ数の増加により無線資源の競合が激化し、個々のユーザの移動による改善効果が相対的に小さくなつたためであると考えられる。また、初期位置によっては、最大移動距離まで移動しても要求スループットを満たせないユーザが存在することも確認された。移動距離に関しては、小規模環境・大規模環境のいずれにおいても、提案手法はランダム移動と比較して不要な移動を抑制できていることが確認された。これは、提案手法が「消極的移動」の方針に基づき、各ユーザに対して必要最小限の移動距離を算出していることを示している。これらの結果から、提案手法は、ランダムな移動と比較してスループット改善と移動距離抑制の両立が可能である一方、すべてのユーザに対して十分な通信品質を保証できるわけではないことが明らかとなった。今後は、移動によっても改善が困難なユーザに対する追加的な対策を検討する必要がある。

5.4 実験 2：チャネル使用率推定の評価

5.4.1 目的

本実験では、提案手法で用いるチャネル使用率推定モデルの精度を検証する。具体的には、シミュレーション環境において様々なトラフィック負荷、通信距離、端末数の条件下でチャネル使用率を測定し、提案する指數関数ベースの非線形回帰モデルが実測値を精度よく予測できるかを評価する。

5.4.2 方法

ネットワークシミュレータ ns-3 (ver. 3.45) を用い、AP と複数の端末からなる環境を構築した。表 3 に主なシミュレーションパラメータを示す。

表 3: シミュレーションパラメータ

項目	設定値
プロトコル	IEEE 802.11ax
トランスポート層	TCP
トラフィック負荷 (Load)	5 ~ 200 Mbps
端末数 (Stations)	1 ~ 40
通信距離 (Radius)	5 ~ 25 m

シミュレーションでは、トラフィック負荷 L [Mbps]、平均 RSSI R [dBm]、端末数 N をパラメータとして変化させ、各条件におけるチャネル使用率 U を測定した。測定されたデータに対して、チャネル使用率がトラフィック負荷の増加に伴い飽和特性を示すことに着目し、以下の指數関数型飽和モデルを用いた非線形回帰を行った。

$$U(L, R, N) = \text{Max} (1 - \exp(-(aL + bR + cN + d))) \quad (5)$$

ここで、 L はトラフィック負荷 [Mbps]、 R は平均 RSSI [dBm]、 N は端末数であり、 Max はチャネル使用率の最大飽和値を表す。理論的には、チャネル使用率は 0~100% の範囲で推移し、最大値は 100% に制約される。しかし、実際の無線 LAN 環境やシミュレーションにおいてはチャネル使用率が 100% に到達することは稀である。

実際に本シミュレーションデータに対して $\text{Max} = 100$ と固定したモデルでフィッティングを行った場合、以下の式のようになり、 L や N の係数が R に比べ極端に大きく、各

値の影響を正当に表しているとは言い難いと判断した。

$$U(L, R, N) = 100 \left(1 - e^{(-(6.2070L - 0.0057R - 30.9139N - 0.3386))} \right) \quad (6)$$

のことから、チャネル使用率の実効的な上限値は環境条件に依存して変化すると考えられる。そこで本研究では、最大飽和値 Max も回帰係数の一つとして同時に推定することで、高負荷領域における過大評価を抑制し、モデル全体の推定精度を向上させる。

本モデルは、トラフィック負荷の増加に伴いチャネル使用率が指数的に増加し、環境依存の最大飽和値に漸近するというシミュレーション結果の傾向を表現するために導入する。

以下に、シミュレーション結果をグラフにプロットしたものを見ます。

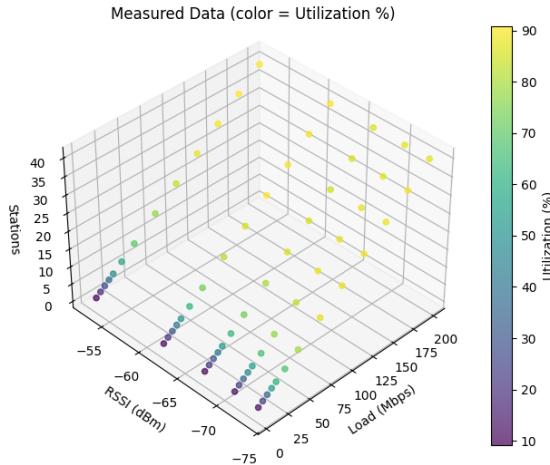


図 5: シミュレーションにおける測定結果

測定値に対して最小二乗法を用いて各係数 (a, b, c, d, Max) を推定し、決定係数 R^2 によりモデルの適合度を評価した。

5.4.3 結果

最小二乗法によるフィッティングから得られた各係数および決定係数を表??に示す。

これにより、チャネル使用率推定モデルは以下のように定式化される。

$$U(L, R, N) = 88.64 (1 - \exp(-(-0.0052L - 0.0062R + 0.2169N - 0.4879))) \quad (7)$$

表??より、トラフィック負荷 L の係数 a が正の値であることから、トラフィック負荷の増加に伴いチャネル使用率が指数的に増加する傾向が確認できる。一方、端末数 N の係

表 4: 導出した係数

係数	推定値
a (Load)	-0.0052
b (RSSI)	-0.0062
c (Stations)	0.2169
d (Bias)	-0.4879
Max (Saturation)	88.64 %
決定係数 R^2	0.9898

数 c が負であることは、端末数の増加によりチャネル競合が激化し、単位時間あたりに観測される有効な送信割合が低下する影響を反映していると考えられる。

この式によって計算された値と実測値(代表点)を比較したのが以下の図である。

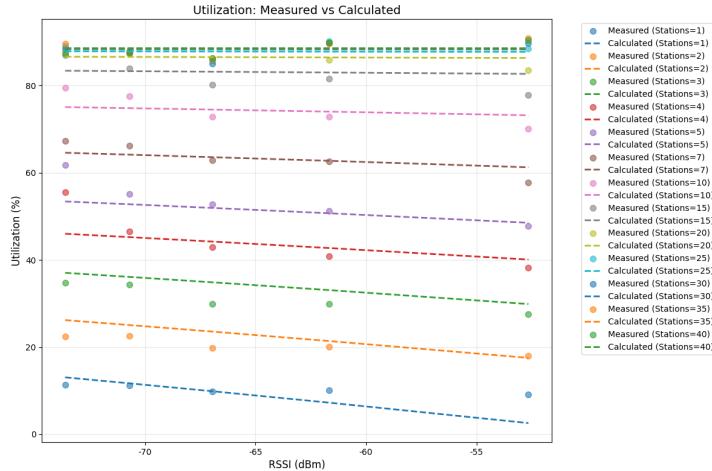


図 6: 計算値と測定結果の比較

5.4.4 考察

実験結果から、提案する指数関数型飽和モデルは、決定係数 $R^2 = 0.9802$ という高い精度でチャネル使用率を推定できることが確認された。これは、本モデルがチャネル使用率の増加および飽和という非線形な特性を適切に捉えていることを示している。

また、高負荷領域においても推定値が過大評価されることなく、最大飽和値 Max に漸

近する挙動が確認されており、実際の無線 LAN 環境におけるチャネル使用率の物理的制約を反映したモデルとなっている。

ただし、本モデルは IEEE 802.11ax 環境でかつシミュレーション下のみの測定結果に基づいて構築されているため、他の無線 LAN 規格や実環境などの条件下では係数の再調整が必要となる可能性がある。また、1 端末が極端に大きな通信をする場合には、想定と異なる挙動をすることも考えられる。

よって、今後は、より多様な環境条件下でのモデルの汎化性能を検証する必要がある。

6 おわりに

6.1 まとめ

本研究では、エンタープライズ無線 LAN 環境における通信品質の改善を目的として、利用者の行動に着目したユーザ行動支援手法を提案した。従来の無線 LAN 環境における通信品質改善は、アクセスポイントの設置や設定調整など、ネットワーク管理者側による技術的対策が中心であった。しかし、実際の利用環境では、利用者の移動や利用行動が通信品質に大きな影響を与えており、管理者側の制御のみでは十分な改善が得られない場合が多い。

そこで本研究では、アクセスポイントと利用者端末との距離に加えて、アクセスポイントが使用するチャネルの使用状況を考慮し、利用者に対して最小限の行動で通信品質が改善されるような行動支援手法を検討した。提案手法の有効性を検証するため、ネットワークシミュレータ ns-3 を用いたシミュレーション評価を行い、利用者がランダムに移動する場合と比較した。

その結果、提案手法を適用することで、ネットワーク全体のスループットが向上し、通信品質のばらつきが抑えられることを確認した。また、利用者の移動を最小限に抑えた状況においても一定の改善効果が得られることから、利用者の負担を増やさずに通信品質を改善できる可能性が示された。これらの結果より、利用者の行動を考慮した通信品質改善手法が、エンタープライズ無線 LAN 環境において一定の効果を持つことが示唆された。

6.2 今後の課題

本研究には、いくつかの課題が残されている。

第一に、本研究で用いた評価はシミュレーション環境に限定されており、実際の無線 LAN 環境における検証は行っていない点である。実環境では、建物構造による電波遮蔽や反射、外部ネットワークからの干渉、端末性能の違いなど、シミュレーションでは十分に再現できない要素が存在する。今後は、実環境での実験や測定を通じて、提案手法の実用性を検証する必要がある。

第二に、本研究では利用者の行動を比較的単純なモデルで扱っている点が挙げられる。実際の利用者は、通信品質だけでなく、作業内容や滞在時間、周囲の混雑状況など、さまざまな要因を考慮して行動する。今後は、より現実的な利用者行動モデルを導入し、多様な利用シナリオにおける評価を行うことが求められる。

第三に、利用者への行動提示方法についても検討の余地がある。本研究では、行動支援の有効性を主に通信品質の観点から評価したが、実際に利用者に提示する際には、分かりやすさや受け入れやすさも重要な要素となる。通知方法や表示内容、行動を促すための仕組みについて検討することで、より実用的なシステムの実現が期待できる。

今後は、これらの課題に取り組むことで、利用者の行動を考慮した通信品質改善手法をより現実的かつ実用的なものへと発展させていきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究テーマや方針について多大なるご指導を賜りました矢俊志先生に心より感謝申し上げます。また、日頃より支えてくださった家族に対しても、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 観光庁：令和6年度「訪日外国人旅行者の受入環境整備に関するアンケート」調査結果, 観光庁（オンライン）, 入手先<<https://www.mlit.go.jp/kankochō/content/001882887.pdf>>（参照2025/12/30）.
- [2] 株式会社ミライト・ワン：「スタジアム高密度Wi-Fiソリューション」の導入・運営支援, 株式会社ミライト・ワン（オンライン）, 入手先<<https://www.mirait-one.com/casestudy/2022070100.html>>（参照2025/12/30）.
- [3] Cisco Systems, I.: Enterprise Mobility 8.5 設計ガイド, Cisco Systems, Inc.（オンライン）, 入手先 <https://www.cisco.com/c/ja_jp/td/docs/wireless/controller/8-5/Enterprise-Mobility-8-5-Design-Guide/Enterprise_Mobility_8-5_Deployment_Guide/wlanrf.html>（参照2026/1/3）.
- [4] 西日本電信電話株式会社：IEEE802.「11g」「11n」「11ac」「11ax」って何?, 西日本電信電話株式会社（オンライン）, 入手先<https://flets-w.com/chienetta/pc_mobile/cb_wi-fi06.html>（参照2026/1/5）.
- [5] : IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, *IEEE Std 802.11-2024 (Revision of IEEE Std 802.11-2020)*, pp. 1–5956 (online), DOI: 10.1109/IEEESTD.2025.10979691 (2025).
- [6] フルノシステムズ：Wi-Fiの電波干渉とは?通信に悪影響を与える主な原因と対処法, フルノシステムズ（オンライン）, 入手先<<https://www.furunosystems.co.jp/column/2024/01/001612/>>（参照2026/1/25）.
- [7] ns 3 Consortium: ns-3: Network Simulator 3.
- [8] Ranasinghe, V., Rajatheva, N. and Latva-Aho, M.: Graph Neural Network Based Access Point Selection for Cell-Free Massive MIMO Systems, *Proceedings - IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM*, (online), DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685221 (2021).
- [9] Wu, B., Funabiki, N., Kong, D., Wang, X., Seto, T. and Fan, Y. C.: An Enhanced Active Access-Point Configuration Algorithm Using the Throughput Request Satisfaction

Method for an Energy-Efficient Wireless Local-Area Network, *Symmetry*, Vol. 16, p. 1005 (online), DOI: 10.3390/sym16081005 (2024).

- [10] Rowden, A., Krokos, E., Whitley, K. and Varshney, A.: Exploring Effective Immersive Approaches to Visualizing WiFi, *Proceedings - 2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 732–740 (online), DOI: 10.1109/ISMAR59233.2023.00088 (2023).
- [11] Miyata, S., Murase, T. and Yamaoka, K.: Novel access-point selection for user QoS and system optimization based on user cooperative moving, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E95-B, pp. 1953–1964 (online), DOI: 10.1587/transcom.E95.B.1953 (2012).
- [12] Bianchi, G.: Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No. 3, pp. 535–547 (online), DOI: 10.1109/49.840210 (2000).
- [13] Zhao, P., Yang, X., Dong, C., Yang, S., Bhattacharai, S. and Yu, W.: On an Efficient Estimation of Available Bandwidth for IEEE 802.11-Based Wireless Networks, *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/GLOCOM.2011.6134282 (2011).
- [14] Rossi, C., Casetti, C. and Chiasseroni, C.-F.: A Passive Solution for Interference Estimation in WiFi Networks, *Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks* (Guo, S., Lloret, J., Manzoni, P. and Ruehrup, S., eds.), Cham, Springer International Publishing, pp. 156–168 (2014).
- [15] Guterman, C., Grinshpun, E., Sharma, S. and Zussman, G.: RAN Resource Usage Prediction for a 5G Slice Broker, *Proceedings of the Twentieth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, MobiHoc ’19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 231–240 (online), DOI: 10.1145/3323679.3326521 (2019).
- [16] 株式会社バッファロー：中小企業の 72.7 %が「家庭用 Wi-Fi ルーター」を業務利用していることが明らかに【中小企業の通信環境を調査】 — buffalo.jp, <https://www.buffalo.jp/press/detail/20230323-01.html>. [Accessed 12-08-2025].
- [17] NS-3 Project: ns-3 Network Simulator, <https://www.nsnam.org/> (2026). (Accessed 2026-01-26).

- [18] Apple Inc.: Apple 製品の導入ガイド, <https://support.apple.com/ja-jp/guide/deployment/dep98f116c0f/web> (2025). (Accessed 2025-01-27).
- [19] Juniper Networks: RSSI-Based Fast Roaming, <https://www.juniper.net/documentation/us/en/software/mist/mist-wireless/topics/topic-map/rssi-fast-roaming.html> (2025). (Accessed 2025-01-27).
- [20] wlanprofessionals.com: Revolution WiFi MCS to SNR Levels, https://d2cpnw0u24fjm4.cloudfront.net/wp-content/uploads/LaminatedCard_MCSValuesforVariousSNR1.pdf (2017). (Accessed 2025-01-27).
- [21] Cisco Systems, Inc.: Wi-Fi 6/6E および Wi-Fi 7 ワイヤレススループットの検証とテスト, https://www.cisco.com/c/ja_jp/support/docs/wireless-mobility/wireless-lan-wlan/212892-802-11ac-wireless-throughput-testing-and.html (2025). (Accessed 2025-01-27).