

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 矢崎俊志
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に加えて、AP が使用するチャネルの使用率を考慮することで、より実環境に即した通信品質評価を行うことで、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、通信品質の改善とともに、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が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。観光庁の調査（2025）[?]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[?]. 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[?]. 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章では、提案手法・システムについて述べる。第4章では、評価実験について述べる。第5章で本論文をまとめる。

2 背景知識

2.1 無線 LAN の基礎技術 [?],[?]

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 [?]

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 [?]

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 [?]. 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 [?]

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、測定の単位時間 T を用いて、一般に以下の式で計算される。

$$U_{ch}(\%) = \frac{T_{busy}}{T} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 T_{busy} は、観測期間中にチャネルが他の端末によって使用されていた総時間を指す。

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[?]

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

関連研究として、ユーザの移動に注目したもので miyata 氏のものがある。これはユーザの移動によって Wi-Fi の通信品質を改善しようとするものであるが、これはユーザを最大限移動させて通信環境を良化させるものであった。また、チャネル使用率について、推定しようとする研究はある。福原ら [X] は、プローブパケットを使用せずに無線 LAN のチャネル占有率を推定する受動的手法を提案した。彼らの手法は、無線 LAN 無線リソースの利用率指標として時間占有率を定義し、実際の送信時間のみを考慮する従来の測定手法の限界に対処する。提案手法 Method3 は、インターフレーム間隔 (IFS) とバックオフ期間を含めて総占有時間を算出し、データパケットとビーコン内のシーケンス番号を活用することでパケット損失を補正する。3つの測定手法を比較した実験により、解析装置と通信リンク間の距離が増加すると従来手法の性能が低下する一方、Method3 は著しいパケット損失条件下でもチャネル占有率を 98% 以上の精度で推定できることを実証した。

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。

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。

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。

$$d_{u,a} = |P_a - (P_u - m)| \quad (2)$$

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。

$$Score(a) = \sum_i w_i \cdot score_i(a) \quad (3)$$

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。

$$\Theta_{a,m}^{after} = \theta_{a,m}^{after} + \sum_{i \neq a} \theta_i^{before} \quad (4)$$

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。チャネル使用率は、IEEE 802.11k 規格において BSS Load 要素として定義されており、多くの商用 AP から定期的にビーコンフレーム内で広報される情報である。しかしながら、一部の AP やネットワーク構成においては、この情報が提供されない場合や、取得が困難な場合が存在する。そのため、本研究の提案手法の適用範囲を拡大し、より汎用的なシステムとして実装するためには、チャネル使用率を直接取得できない環境においても、他の観測可能なパラメータから間接的にチャネル使用率を推定する手法が必要となる。

本節では、シミュレーション環境における評価を想定し、RSSI、ユーザの通信帯域幅、および AP 接続ユーザ数といった容易に取得可能なパラメータを用いて、チャネル使用率を推定する手法を提案する。

4.3.1 推定手法の方針

チャネル使用率は、無線チャネルが実際に通信に使用されている時間の割合を表す指標であり、以下の要因によって変動する。

- 接続ユーザ数：ユーザ数が多いほど、チャネルへのアクセス競合が増加し、使用率が上昇する
- 通信帯域幅：各ユーザが要求する帯域幅が大きいほど、チャネル占有時間が増加する
- 伝搬環境：AP とユーザ間の距離や障害物により、RSSI（受信信号強度）が変化し、これが再送制御や MCS（Modulation and Coding Scheme）選択に影響を与える

これらの要因を踏まえ、本研究では RSSI、通信帯域幅、ユーザ数の 3 つのパラメータを説明変数として、チャネル使用率を目的変数とする回帰モデルを構築する。

4.3.2 データ収集と回帰分析

チャネル使用率推定モデルの構築には、以下の手順を用いた。

シミュレーション条件の設定 ネットワークシミュレータを用いて、ユーザ数、各ユーザの通信帯域幅、および AP とユーザ間の距離をパラメータとして変化させた複数のシミュレーションを実施した。具体的には、以下の条件を組み合わせた実験を行った。

- ユーザ数 : $n = \{1, 2, 3, \dots, N_{max}\}$
- 通信帯域幅 : $B = \{B_1, B_2, \dots, B_k\}$ [Mbps]
- AP とユーザ間距離 : $d = \{d_1, d_2, \dots, d_l\}$ [m]

各条件の組み合わせについて、シミュレーション実行中に真のチャネル使用率 U_c を測定し、同時に RSSI 値を記録した。

回帰モデルの導出 収集したデータセット $\{(RSSI_i, B_i, n_i, U_{c,i})\}_{i=1}^M$ に対して、最小二乗法による多変量回帰分析を実施した。チャネル使用率 \hat{U}_c を推定する回帰式は、以下の形式で表される。

$$\hat{U}_c = \beta_0 + \beta_1 \cdot RSSI + \beta_2 \cdot B + \beta_3 \cdot n + \epsilon \quad (5)$$

ここで、 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ は回帰係数、 ϵ は誤差項である。回帰係数は、観測データに対する残差平方和を最小化するように決定される。

必要に応じて、パラメータ間の相互作用項や非線形項（例： $RSSI^2, n \cdot B$ ）を導入することで、推定精度の向上を図ることも可能である。

推定式の検証 導出した回帰式の妥当性を評価するため、訓練データとは異なるテストデータに対して推定を行い、真の値との決定係数 R^2 や平均二乗誤差（RMSE）を算出した。推定精度が十分に高いことを確認した上で、シミュレーション評価において本推定式を適用する。

4.3.3 シミュレーションへの適用

提案手法の性能評価を行うシミュレーションにおいては、各時刻における各 AP のチャネル使用率を、導出した回帰式を用いてリアルタイムに推定する。具体的には、シミュレーション内で観測可能な RSSI、各ユーザの通信帯域幅、および AP 接続ユーザ数を入力として、推定式 \hat{U}_c によりチャネル使用率を算出する。この推定値を提案アルゴリズムの評価スコア算出に利用することで、チャネル使用率情報が直接取得できない環境においても、提案手法の有効性を評価することが可能となる。

4.3.4 推定手法の意義と限界

本推定手法により、シミュレーション環境においても現実的なチャネル使用率の評価が可能となり、提案アルゴリズムの性能検証をより現実に即した条件で実施できる。また、実環境への適用を考えた場合においても、BSS Load 要素を広報しない AP が存在する環境や、クライアント側からの観測のみでシステムを構築する必要がある場合には、本推定手法が有用となる。

一方で、本推定手法はシミュレーション環境において収集したデータに基づいているため、実環境における電波伝搬特性の複雑さや、干渉源の影響、MAC プロトコルの詳細な挙動などを完全には反映できない可能性がある。実環境への適用にあたっては、実測データを用いた回帰モデルの再学習や、機械学習手法の導入による推定精度の向上が今後の課題として挙げられる。

Algorithm 1 提案アルゴリズム

1: **Input:** P_u (ユーザ位置), d_{th} (移動閾値), θ_{th} (スループット閾値), A (AP集合)

2: **Output:** a^* (最適AP), m^* (最適移動ベクトル)

3:

4: $A_{cand} \leftarrow \{a \in A | d_{u,a} \leq d_{th}\}$ where $d_{u,a} = |P_a - (P_u - m)|$ ▷ 式(1)(2)

5:

6: **for** each $a \in A_{cand}$ **do**

7: $\theta_a^{before} \leftarrow n_a / \sum_{i=1}^{n_a} (1/b_{i,a})$ ▷ 式(3)

8: $\theta_{a,m}^{after} \leftarrow (n_a + 1) / (n_a/\theta_a^{before} + 1/b_{new,a})$ ▷ 式(4)

9: **if** $\theta_{new,a} < \theta_{th}$ or $|m| > d_{th}$ **then** ▷ 式(5)による判定

10: $A_{cand} \leftarrow A_{cand} \setminus \{a\}$

11: **end if**

12: **end for**

13:

14: **for** each $a \in A_{cand}$ **do**

15: $score_{\theta_a} \leftarrow (\theta_{a,m}^{after} - \theta_{min}) / (\theta_{max} - \theta_{min})$ ▷ 式(6)

16: $score_{d_{u,a}} \leftarrow 1 - (d_{u,a} - d_{min}) / (d_{th} - d_{min})$ ▷ 式(7)

17: $score_{U_c} \leftarrow (1 - U_c)$, $score_{n_a} \leftarrow 1 - (n_a / n_{max})$ ▷ 式(8)(9)

18: $Score(a) \leftarrow \sum_i w_i \cdot score_i(a)$ ▷ 式(10)

19: **end for**

20:

21: $A'_{cand} \leftarrow \text{top-3 APs by } Score(a)$ ▷ 式(11)

22: $\{a^*, m^*\} \leftarrow \arg \max_{(a,m), a \in A'_{cand}} \theta_{a,m}^{after}$ ▷ 式(12)

23:  $\{a^*, m^*\}$

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1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

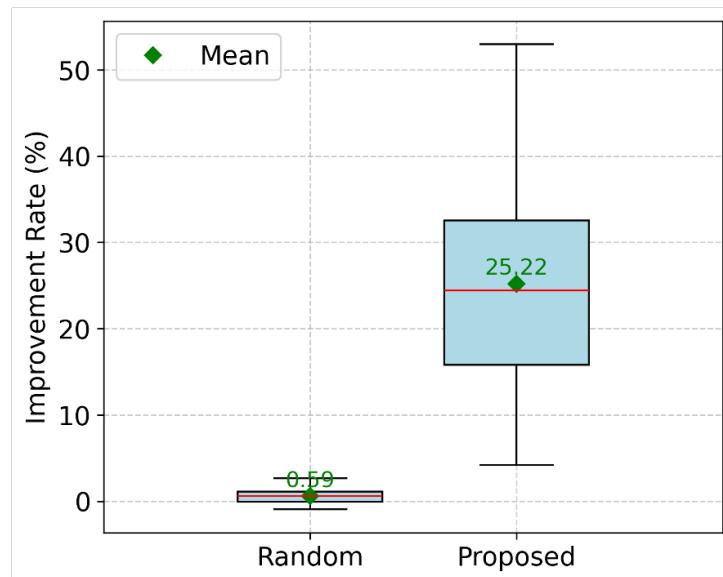


図1: スループット改善率

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2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。

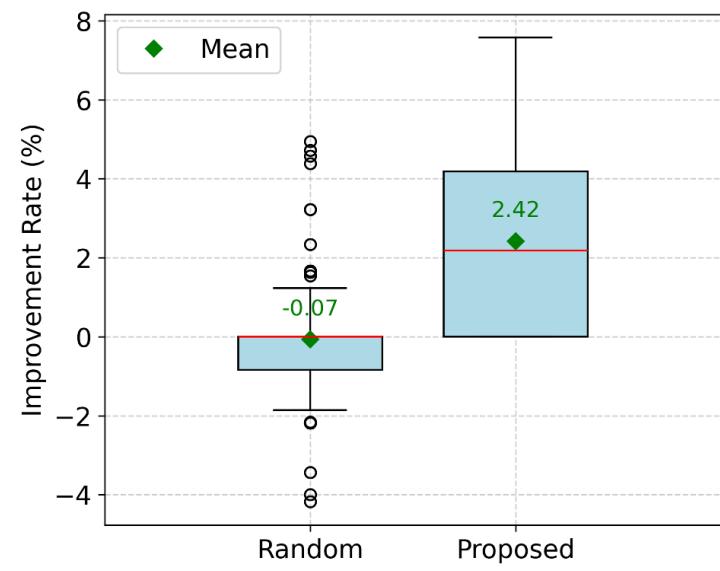


図 2: 移動距離の平均値

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、提案する指数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 2 に主なシミュレーションパラメータを示す。

表 2: 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、以下の指数関数型飽和モデルを用いた非線形回帰を行った。

$$U(L, R, N) = \text{Max} (1 - \exp(-(aL + bR + cN + d))) \quad (6)$$

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。

$$U(L, R, N) = 100 \left(1 - e^{(-(6.2070L - 0.0057R - 30.9139N - 0.3386))} \right) \quad (7)$$

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。

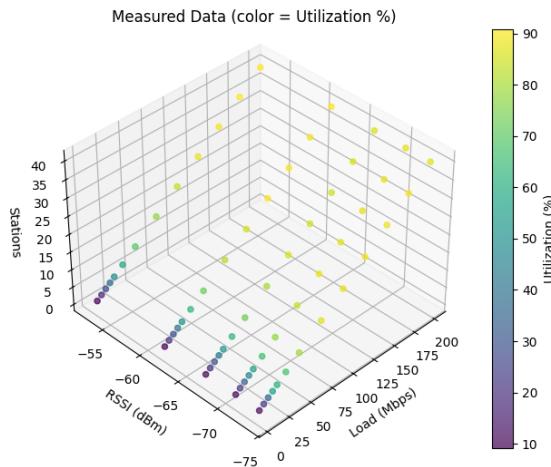


図 3: シミュレーションにおける測定結果

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。

$$U(L, R, N) = 88.64 (1 - \exp(-(-0.0052L - 0.0062R + 0.2169N - 0.4879))) \quad (8)$$

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