

ユーザ視点に基づく
モバイルネットワークに関する研究

Research on Mobile Network
on the Basis of a User's View Point

2014年2月

泉川 晴紀
Haruki Izumikawa

ユーザ視点に基づく
モバイルネットワークに関する研究

Research on Mobile Network
on the Basis of a User's View Point

2014年2月

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科
情報理工学専攻 画像情報研究

泉川 晴紀
Haruki Izumikawa

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本論文の構成	3
第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング	6
2.1 マルチホップ無線ネットワーク	6
2.2 マルチホップ無線ネットワークにおけるパフォーマンス公平性に関する課題	8
2.3 公平性改善に関する従来手法	12
2.4 ユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング手法	14
2.4.1 Own-Traffic-Queue と Uplink-Traffic-Queue 間のスケジューリング	15
2.4.2 Downlink-Traffic-Queue を含むスケジューリング	18
2.5 シミュレーション評価	18
2.5.1 シミュレーション条件	18
2.5.2 無線端末間無線マルチホップシナリオ	19
2.5.2.1 静的配置による評価	19
(1) アップリンク CBR トラフィックを用いた評価	20
(2) FTP トラフィックを用いた評価	27
2.5.2.2 ランダム配置による評価	29
2.5.3 中継局間無線マルチホップシナリオ	31
2.6 まとめ	35
第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ	36
3.1 異種無線ネットワーク	36
3.2 異種無線ネットワーク探索	38
3.2.1 従来手法	39
3.2.2 カバレッジ情報を活用した異種無線ネットワーク探索	41

3.2.2.1	カバレッジ情報の動的作成	41
3.2.2.2	カバレッジ情報を用いたネットワーク探索	44
3.2.2.3	カバレッジ情報を用いたネットワーク探索システムの試作とフィールド評価.....	45
3.2.2.4	消費電力評価	48
3.2.3	無線 WAN の受信信号強度の変動を活用した異種無線ネットワーク探索	50
3.3	異種無線ネットワーク選択	52
3.4	異種無線ネットワーク切り替え	53
3.4.1	従来手法	53
3.4.2	SIP ベースの異品質ストリームのバイキャスト手法.....	58
3.4.2.1	Back-to-back user agent (B2BUA)を用いたバイキャスト	59
3.4.2.2	Third party call control (3pcc)を用いたバイキャスト	65
3.4.2.3	B2BUA を用いたバイキャストと 3pcc を用いたバイキャストの比較.....	66
3.4.2.4	ハンドオーバー支援サーバ機能の分離	69
3.4.3	バーチカルハンドオーバーにおける遅延時間差吸収手法	70
3.4.4	提案手法の実装及び性能評価	73
3.4.4.1	提案手法の実装と評価システム	73
3.4.4.2	性能評価	75
3.5	まとめ	81
第 4 章	蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード.....	82
4.1	遅延／切断耐性ネットワーク	82
4.2	展開に向けた課題	83
4.3	通信オペレータが直面している課題とセルラトラヒックの時空間特徴	83
4.4	RoCNet: 蓄積運搬転送を用いたセルラトラヒックのオフロード	90
4.4.1	関連技術	90
4.4.2	セルラアップリンクの空間的オフロード	92

4.4.3	トラヒックオフロード効果の評価	96
4.5.3.1	シミュレーションモデル	96
4.5.3.2	シミュレーションシナリオ	100
4.5.3.3	シミュレーション結果	103
4.5.3.4	RoCNet 実現時の課題	110
4.5	まとめ	111
第5章	結論	112
	謝辞	115
	参考文献	116
	研究業績	125

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1970～80年代のTCP/IPを用いたパケット通信に基づくインターネットアーキテクチャの登場及び初期普及時は、主として学術ネットワークとして利用されるものであり、営利目的ではなかった。一方、そのアーキテクチャの有する柔軟性や拡張性の高さ故に、インターネットは爆発的に世界中へ広がった[1]。

それまでの通信網（電話網）は、通信を行う両者が通信回線を専有して通信を実施する回線交換方式のネットワークであったが、インターネットは通信回線を複数のユーザで共有し、そこにパケットと呼ばれる単位に分割されたデータを間欠的に送信するパケット交換方式のネットワークである。そのため、回線交換方式に比べ、通信回線や交換機等の通信設備の利用効率に優れる。また、1本の回線が複数ユーザで共有されることから、通信量が増加してネットワークの輻輳によりデータが喪失すると、データ再送数が増えて輻輳度合いが増加する悪循環に陥り、輻輳崩壊に至ることから、輻輳制御技術（主に、Transmission Control Protocol: TCP）[2][3]が用いられている。インターネットは、このTCP/IPの柔軟性に支えられて成長を続けている。また、インターネットを含むデータ通信はこれまで、据え置き型のデスクトップPCから固定回線を通じて行われてきたが、2000年前後から、“いつでも・どこでも”データ通信を行いたい、というユーザニーズのもと、アクセスの無線化、モバイル化が急速に進んでいる[4]。

一方、爆発的なインターネットの普及に伴い、通信インフラからアプリケーションまで、インターネット関連のビジネス化が急速に進んだ。一般に、ビジネス化すると、サービスのマネタイズに主眼が置かれることとなり、新しいアプリケーションやサービスの考案とともに、コスト削減、効率性向上といった視点での検討が行われることとなる。また、通信インフラの構築は多額の設備投資を必要とすることもあり、上述したアクセスの無線化、モバイル化の実現へ向け、低コスト化・高効率化を目的とした多様なネットワーク形態が次々に出現している。その際、サービスの収益化に主眼が置かれ、時として、ユーザ視点が忘れ去られがちとなる。しかし、実際に通信サービスを受けるのはユーザであるため、ユーザ視点に立った検討が重要となる。

一般に、無線を用いた通信では、無線アクセスポイントと無線端末間に存在するビルや壁などの障害物による遮蔽が原因で生じる信号強度の落ち込みなどにより、サービスエリア内にも関わらず無線アクセスポイントと通信を行うことができない不感地帯が存在する。全てのエリアをサービスエリアとすべく無線アクセスポイントを建

第1章 序論

設するのは効率的でないことから、アクセス手段の無線化を低コストに実現すべく、無線装置間を無線で接続してネットワークを構築するマルチホップ無線ネットワーク[5]が考案された。マルチホップ無線ネットワークには、ユーザの通信端末間を無線で数珠つなぎに連結させて無線アクセスポイントまで接続させる形態や、無線アクセスポイント間を無線にて数珠つなぎに接続し、有線回線を有する無線アクセスポイントまでつなげる形態があるが、いずれの場合も、無線アクセスポイント設置コストや有線回線整備コストを抑制可能となり、インフラ構築スピードおよびインフラ構築コストの両面から好適である。しかしながら、マルチホップ無線ネットワークでは、有線回線を有する無線アクセスポイントまでの無線ホップ数によってスループットに差異が生じるという課題がある。つまり、有線回線を有する無線アクセスポイントまでの無線ホップ数の大きいユーザは、十分な品質の通信サービスを受受できない可能性が生じる。このようなユーザ間の不公平性に関する課題に取り組む必要がある。

また、インターネットへのアクセス手段の無線化が急速に進んだことを背景に、数多くの無線通信システムが登場しているが、それぞれのシステムはユニークな特徴を有する。例えば、セルラシステムは広いカバーエリアを有する一方、無線LANは高速な通信を提供する。単一のシステムで全ての用途をカバーするためには莫大なコストが必要となることから、複数の異なる通信システムを組み合わせるネットワークを構築し、用途に応じて通信システムを使い分ける異種無線ネットワーク形態[6]が考案された。現在、すでに多くの携帯型通信端末（携帯電話、スマートフォン等）が複数の通信システムをサポートしており、異種無線ネットワークはユーザにとっても一般的なネットワーク形態となっている。このような異種無線ネットワークに対し、従来研究では、接続する通信システムを切り替えるバーチカルハンドオーバ実行時において、ネットワークレベルでの指標に着目し、IPパケット損失数低減やハンドオーバ遅延時間短縮を目的としていた[7]。しかしながら、ユーザ視点で見ると、接続する通信システムを切り替えても利用しているサービスに途切れ等が生じずサービスの利用を継続できるとともに、高速な通信システムへ切り替わった場合は利用しているサービス品質が向上するなど、切り替えによるメリットを享受できることが重要である。これは特に、サービスの途切れや品質に敏感なリアルタイム通信時において重要となる。これまでは、特に無線通信では回線交換方式を用いてサービス提供がなされてきた音声等のリアルタイム通信が、昨今の技術革新による無線通信の高速化・安定化に伴い、パケット交換方式で提供されつつある（例えば、LTEシステムにおけるVoice over LTE (VoLTE) [8]）。よって、異種無線ネットワークにおけるリアルタイムサービスのユーザ目線での品質向上に取り組む重要性は一層増加している。さらに、異種無線ネットワークでは、実際にネットワークを切り替える前には、切り替える先のネットワ

第1章 序論

ークを探索するフェーズが必要となるが、このフェーズの研究はあまりなされていない。実際に異種無線ネットワークのサービス化を行う際は、低消費電力で効率的なネットワーク探索が必要となることから、検討を行う必要がある。

一方、これまでは、“いつでも・どこでも”通信を可能にすることを目的に通信技術が発展し、通信の仕組みも、ネットワークやサーバを含む通信相手へアクセス可能であることを前提としたものであった。しかしながら、実際は、ネットワークへのアクセス手段の提供には、時間的・空間的な制限がある。そこで、発想を転換し、遅延が極めて大きい状況や、ネットワークとのリンクが切断されても、ネットワークと非同期で情報伝達を実現する遅延／切断耐性ネットワーク形態[9]が考案された。遅延／切断耐性ネットワークでは、時間的制限に対応するための通信端末でのデータの「蓄積」と、空間的制限に対応するための通信端末によるデータの物理的な「運搬」、そしてデータを別の通信端末へ送信する「転送」からなる、蓄積運搬転送と呼ばれるメッセージ中継技術が用いられる。遅延／切断耐性ネットワークは、深宇宙や海上、深海といった劣悪な通信環境のみならず、災害等で一時的に通信インフラが利用不可になった場合にも活用でき、特に後者に関して、一般ユーザの立場からも非常に有用であろうことは、陸上の通信インフラに壊滅的被害が生じた2011年3月の東日本大震災の経験からも明らかである。ところが、現実には遅延／切断耐性技術は研究レベルに留まっており、一部のニッチなマーケットを除いて、実用化の方向が見えていない。この要因は、遅延／切断耐性ネットワーク形態のマネタイズの難しさ、つまり遅延／切断耐性ネットワークを導入することによる通信オペレータのメリットを見出しづらいことにあると考えられる。そこで、劣悪な通信環境でない通常的环境でも、蓄積運搬転送メッセージ中継技術をうまく活用し、通信オペレータの課題（例えば急増するモバイルトラヒック）を解決するような取り組みが必要となる。

1.2 本論文の構成

本論文では、通信装置間を無線で接続してネットワークを構築するマルチホップ無線ネットワークにおける、通信装置間の無線リソース配分の公平性に関する研究のほか、モバイル WiMAX やセルラシステム、無線 LAN 等の複数の異なる通信システムを組み合わせてネットワークを構築する異種無線ネットワークにおける、ネットワークの切り替え（バーチカルハンドオーバー）に関する研究、遅延が極めて大きい状況や

第1章 序論

ネットワークとのリンクが切断する状況でも，ネットワークと非同期での情報伝達を実現する遅延／切断耐性ネットワークをセルラネットワークと組み合わせ，高負荷のセルラエリアのトラヒックをオフロードする研究に関して，それら成果をまとめる．

各章の概要を以下に記載する．

第2章ではまず，マルチホップ無線ネットワークについて説明し，その後，マルチホップ無線ネットワークで発生するパフォーマンス公平性に関する課題について述べる．続いて，マルチホップ無線ネットワークにおいて，ホップ数の違いによるスループット差異を低減するためのパケットスケジューリングアルゴリズムを提案する．提案アルゴリズムは，複雑な計算処理や新たなシグナリングメッセージの導入，既存MAC (Media Access Control)プロトコルへの変更を必要とせず，ユーザの通信端末や無線アクセスポイント内のパケットスケジューリング方法のみを変更することにより，その効果を得ることが可能となる．シミュレーションによる性能評価を実施し，提案するスケジューリングアルゴリズムにより，ユーザの通信端末間のスループット差異を低減することができ，提案アルゴリズム適用前後で通信端末間スループットの公平性が最大で10倍程度向上することを示す．

第3章では，異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー時に必要となる三つのステップ「異種無線ネットワーク探索」，「異種無線ネットワーク選択」，「異種無線ネットワーク切り替え」について述べる．まず，異種無線ネットワーク探索について，通信端末が収集した各通信システムのカバレッジ情報を元にしたネットワーク探索手法や，接続中のセルラネットワークの受信電波強度監視による無線LANネットワーク推定手法を提案する．続いて，異種無線ネットワーク切り替えについて，一般的に高いサービス品質レベルを要求される双方向リアルタイムアプリケーションを対象に，異種無線ネットワークにおける，ユーザ視点に基づくSIPベースのシームレスハンドオーバー方式を提案する．提案方式を利用することで，例えばユーザが移動しながらIPテレビ電話アプリケーションを利用しても，バーチカルハンドオーバーによるサービスの途切れが発生せず，かつ切り替え先の通信システムに応じたテレビ電話品質に自動的に変更される．本方式は，異なるストリームのバイキャストイング手法と，遅延差吸収手法から構成される．異種無線ネットワーク環境では，無線ネットワーク毎に伝送速度や通信遅延時間が異なるため，両手法によりその差を吸収し，ユーザには連続したサービスを提供する．パーソナルコンピュータへ提案方式を実装し，ネットワークエミュレータを利用した実機評価を通して，提案方式によりユーザへ表示されるテレビ電話のデコードフレームの連続性がバーチカルハンドオーバー前後でも保たれ，ユーザ目線でのシームレスなサービス継続が可能であることを示

第1章 序論

す．一方，比較として，従来手法では，バーチカルハンドオーバ前後で，IP パケットレベルでは連続性が保たれるが，テレビ電話のデコードフレームでは途切れが生じることも示す．

第4章ではまず，遅延／切断耐性ネットワークについて簡単に説明し，その後，遅延／切断耐性ネットワークの展開に向けた課題について論じる．続いて，通信オペレータが直面している課題である，セルラトラヒックの急増について述べ，当該トラヒックの時空間の特徴を調べる予備実験について説明する．その後，遅延／切断耐性ネットワークの技術を適用し，セルラトラヒックをオフロードする **RoCNet (Robust cellular network)** と呼ぶ手法を提案する．**RoCNet** は，セルラトラヒック負荷の高いエリアから，同負荷の低いエリアへ物理的にトラヒックを分散させ，空間的なトラヒック量の平滑化を図る手法である．**RoCNet** では，パーティクルフィルタを用いて，過去の履歴からセルラトラヒック負荷の高いエリアから同低いエリアへ移動しそうな端末を推測し，当該端末へデータ運搬をさせることで，オフロード効果を高める．コンピュータシミュレーションによる評価を実施し，**RoCNet** により，トラヒック負荷の高いエリアにおいて，ピークトラヒック量を2割程度，混雑時の平均トラヒック量を1/3程度軽減できることを示す．

最後に，第5章では，本論文に記載した研究成果の結論をまとめる．

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

本章ではまず，マルチホップ無線ネットワークの特徴を説明する．その後，マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間のスループット公平性に関する課題を明確にした上で，既存の研究について紹介する．続いて，既存研究に比してシンプルな処理でユーザ間公平性を向上可能とするパケットスケジューリング手法を提案する．最後に，コンピュータシミュレーションによる性能評価結果を紹介する．

2.1 マルチホップ無線ネットワーク

無線にて通信サービスを提供するには，有線回線を有し，ユーザの無線端末 (Wireless Node: WN)と，例えばインターネット間の通信を橋渡しする無線基地局 (Base Station: BS)やアクセスポイント (Access Point: AP) (以下，BSとまとめる)を設置して，所定品質以上の電波到達範囲として定義されるサービスエリアを構築する必要がある．ここで，サービスエリアを拡大するには，BS当たりの電波到達範囲を広げるか，BSを新たに設置する必要がある．

限られた周波数のリソース (帯域幅)でBS当たりの電波到達範囲を広げると，BS当たりの収容WN数が増加し，BSがWNに割り当てるリソースが枯渇するという課題がある．これは，十分な通信サービスを提供できないことを意味する．また，WNに対して高いピーク送信電力を要求することになる．

そのため，近年の，携帯電話網に代表される無線による通信サービスにおいては，BS当たりの電波到達範囲を狭めて収容WN数を抑えつつ，新たなBS設置によりサービスエリアを拡大する方法が採られている．しかしながら，新たなBS設置は，BS本体費用に加え，有線回線 (光ケーブル等)の延伸工事や建物内配線工事等の費用も発生し，通信コストが高くなるという課題がある．

また，いずれの場合でも，BSとWN間のビル等の障害物による遮蔽が原因で生じる信号強度の落ち込みなどにより，BSに近くてもBSと通信を行うことのできない不感地帯が存在しうる．

そこで，図2-1に示すように，BSとWN間の通信を，他WNや中継局 (Relay Station: RS)が中継するマルチホップ無線ネットワーク (それぞれ図2-1 (a)，同(b))が注目されている．マルチホップ無線ネットワークでは，BS数を増加させることなくサービス

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

エリアの拡大や不感地帯の解消が可能となる。ここで、RSとは、有線回線を有さず、主に無線中継処理を実施するノードのことを指す。

IEEEにおいては、IEEE802.11 (Wireless LAN Working Group)において、Wireless Distributed System (WDS)を拡張した無線LANベースのメッシュネットワークに関する技術が、IEEE802.11s[10]として2011年7月に規格化された[11]。また、IEEE802.16 (Broadband Wireless Access Working Group)では、RSを配置して通信エリアの拡張を実施するIEEE 802.16jが規格化された(IEEE802.16-2009として公開)。3GPPにおいても、RSを配置することで通信エリアの拡張を図る検討が行われ、3GPP Release 10 (LTE-Advanced)において採用された[12]。

ここで、1つの基地局に複数のWNが接続するPoint-to-Multipoint (P-MP)型の無線通信システムにおいては、BSが、配下のWNからの送信要求に応じて送信機会を割り当てることで、WN間の公平性を保っている。例えば、CDMA2000 1xEV-DOでは、Proportional fairnessスケジューラを採用しており[13]、システムスループット向上(無線リソース効率利用)とWN間の送信機会の公平性を考慮している。

一方、マルチホップ無線ネットワークにおける公正性に関しては、あまり検討が行

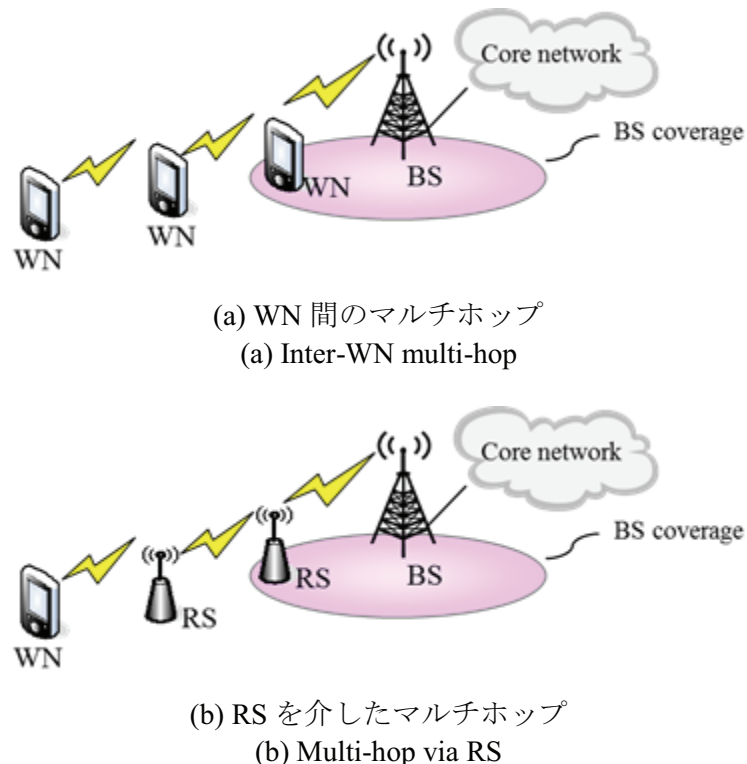


図2-1 マルチホップ無線ネットワーク

Figure 2-1: Multi-hop wireless networks

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

われていない[14]. マルチホップ無線ネットワークでは, BSからのホップ数の異なるWN間で, 特にアップリンクのスループットに差異が生じるという問題がある[14][15]. つまり, BSからのホップ数の大きいWNは, 同小さいWNよりも通信パフォーマンスが劣化する. マルチホップ無線ネットワークを車々間通信のインフラとして用い[16], 交通量のモニタリングを行ったり, 車載カメラで撮影した映像等を配信したりするサービスが検討されているが, アップリンクパフォーマンスの公平性を改善しない限り, ホップ数の小さいWNからの情報しか受けられないなどの支障が生じることとなる.

そこで, 本章では, 筆者が提案している, BSからのホップ数の異なるWN間におけるスループット差異を改善するためのパケットスケジューリングアルゴリズム[17][18]について述べる.

2.2 マルチホップ無線ネットワークにおけるパフォーマンス公平性に関する課題

マルチホップ無線ネットワークでは, WNが自身のトラヒック(自身で生起されたトラヒック)とともに他のWNからの転送トラヒックを送信しなければならないため, BSからのホップ数の異なるWN間でスループットに差異が生じることとなる. 例えば, 図2-2のような, 単一周波数チャネル上で1つのBSと二つのWNから構成される単純なマルチホップ無線ネットワークを考える. 各WNには, BS方向のトラヒック負荷 G がかかっている. WN1は自身のトラヒックフロー $F1$ に加え, WN2からのトラヒックフロー $F2$ もBSへ送信する. この場合, トラヒック負荷 G が一定値(この例の場合は, C をネットワークのキャパシティとして, $C/3$)以下の場合, 図2-3(a)に示すように, トラヒックフロー $F1$ 及び $F2$ が得るスループット $T1$ 及び $T2$ は等しくなる. 一方, トラヒック負荷が前記一定値を超えると, トラヒックフロー $F1$ 及び $F2$ が得るスループット $T1$ 及び $T2$ には, 図2-3(b)に示すような差が生じる[14].

この理由を, 図2-4を用いて説明する. 図2-4は, 4台のWN(WN1~4)が単一周波数チャネル上でマルチホップ無線ネットワークを構築し, BSへデータを送信している様子を示したものである. 各WNは, 隣接するWNとのみ通信することができる. また, 各WNでは, 周期 T 毎に送信パケットが生起するものとする. 簡単のため, ここではパケット衝突等は発生しないものとし, また, 隣接するWNとの同時送信は避けながら, 周期 $2T$ 毎に定期的に送信機会を得るモデルを想定する. また, WNの送

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

信キューは First-In First-Out (FIFO) キューとする。つまり、WN は、送信機会を獲得すると、送信キューの先頭にあるパケットを BS 方向の WN へ送信する (WN1 の場合は BS へ送信する)。また、WN は、自身でパケットを生起した時、及び、隣接 WN からパケットが転送されてくると、送信キューの最後に当該パケットを入れる。

トラフィック負荷が所定値より大きいと、図 2-4 に示すように、隣接 WN への転送レートの自身での生起トラフィックレートより小さくなり、BS からホップ数が多い WN のパケットほど、BS へ到達しにくくなる。図 2-4 では、一定時間経過後の時刻 nT において、BS に到達したパケットの大部分が BS から 1 ホップの場所に位置する WN1 からのパケットであり、BS から最もホップ数の大きい場所に位置する WN4 からのパケットはまだ到着していないことが分かる。

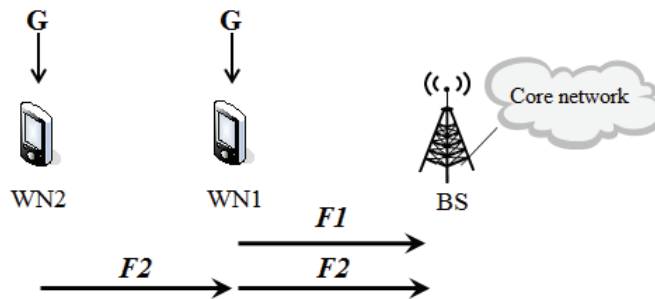
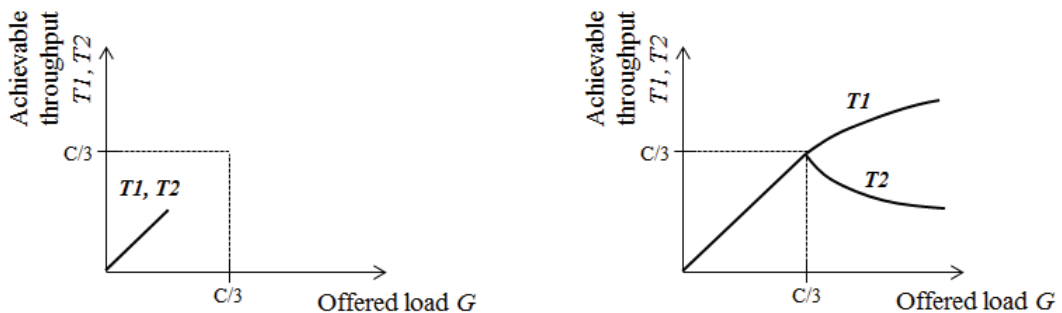


図 2-2 トラフィック負荷 G と BS 方向へのフロー $F1$, $F2$
 Fig. 2-2 Offered traffic G and Flows $F1$ and $F2$ toward BS



(a) トラフィック負荷が低い場合
 (a) The case of lower offered load
 (b) トラフィック負荷が高い場合
 (b) The case of higher offered load

図 2-3 トラフィック負荷 G と $F1$, $F2$ のスループット $T1$, $T2$ (C はキャパシティ)
 Figure 2-3: Offered traffic G and Throughputs $T1$ and $T2$ (C represents the capacity)

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

このように，マルチホップ無線ネットワークでは，特にアップリンクにおけるスループット差異が問題となる．このため，本章では，WN間のアップリンクのスループット差異が小さくなることを，公平性が向上することと定義する．

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

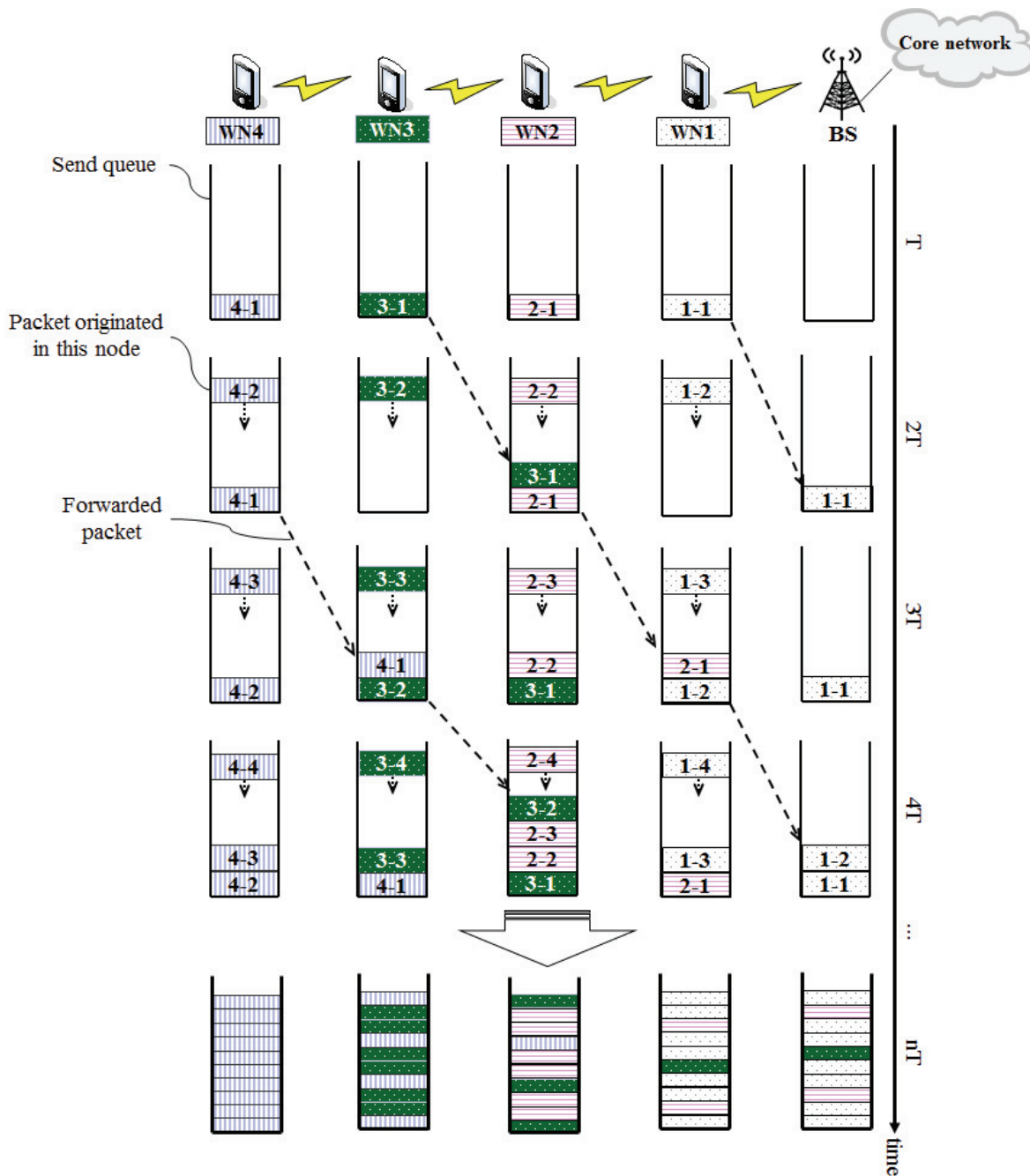


図 2-4 マルチホップ無線ネットワークにおける不公平性問題

Figure 2-4: Unfairness problem in the multi-hop wireless network

2.3 公平性改善に関する従来手法

2.2 で説明した，マルチホップ無線ネットワークにおける WN 間の不公平性の問題は，自身で生起したパケットと転送パケットとを同一の送信キューに蓄積することが主な原因であった．そこで，本問題を改善するため，Jun らは，2 種類の手法を提案している [14]．一つ目の手法は，自身の生起トラヒック（自身のアプリケーション (Application: App.) 等が生起したトラヒック）と転送トラヒックとを別々のキューに入れ，Round-Robin スケジューリングを行う方法である（図 2-5 (a)）．この手法を本章では既存手法 1 と呼ぶ．二つ目の手法は，各 WN においてフロー毎にキューを設け，Round-Robin でスケジューリングする方法である(図 2-5 (b))．本章では，この手法を既存手法 2 と呼ぶ．なお，図 2-5 では，キューマネージャと呼ぶ機能部がキューへのパケット振り分けをしている．

既存手法 1 では，重み付けしない（重みの等しい）Round-Robin スケジューリングを行うと WN 間の公平性の改善効果は限定的だが，適切な重みの重み付け (Weighted) Round-Robin を用いることで，公平性が大きく改善される．ここで，重みの最適値は，マルチホップ経路の BS からの最大ホップ数に依存する．例えば，最大ホップ数の大きな経路に属する WN は，他 WN のトラヒックを多く転送する必要があるため，転送トラヒックを送信する重みを大きくする．最大ホップ数の小さな経路に属する WN は，他 WN からの BS 方向へのトラヒックは少ないことから，転送トラヒックを送信する

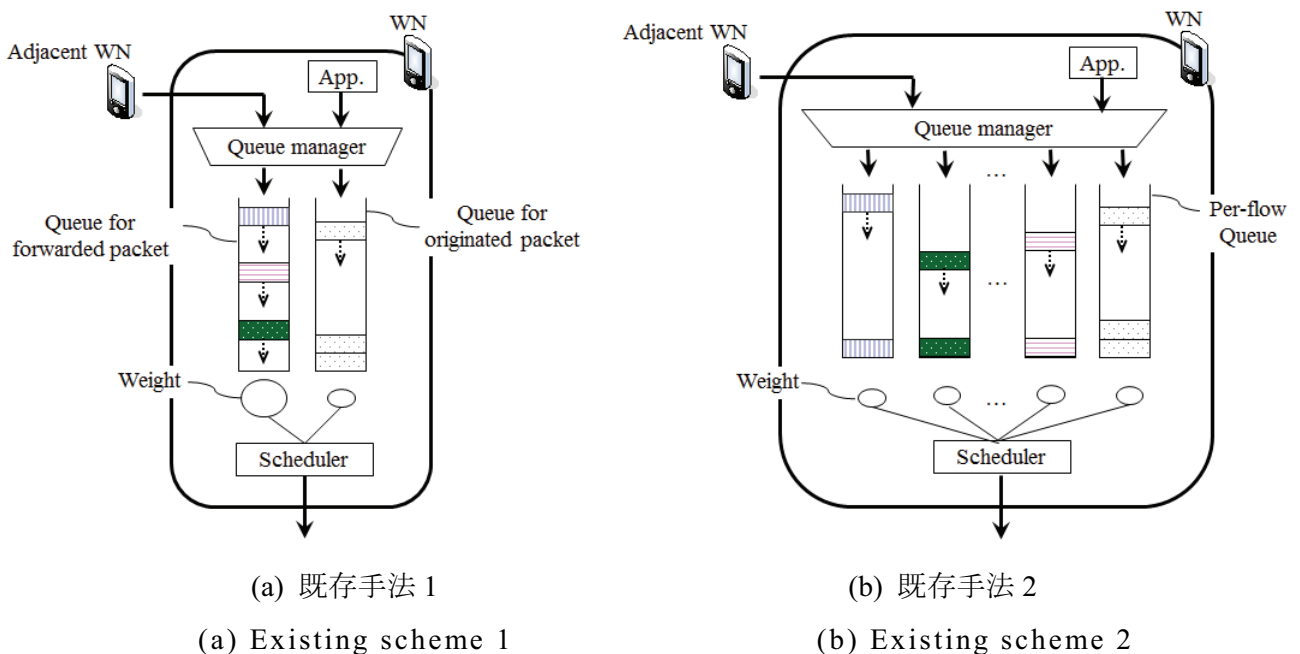


図 2-5 既存手法

Figure 2-5: Existing schemes

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

重みを小さくする。

このように、既存手法 1 を利用するためには、WN が属するマルチホップ経路の BS からの最大ホップ数の情報を各 WN が把握している必要があるが、動的に当該情報を把握するには新たなメッセージを定義・導入する必要がある。また、重みを静的に設定して最適値を利用するには、ネットワークトポロジが不変であるという前提をおかないといけない。

既存手法 2 を用いると、公平性は大きく改善されるものの、新たなトラフィックフローを受信したり、受信していたトラフィックフローが終了するたびに、適応的にキューの作成・削除を行う必要がある。また、フロー数が増加すると、キューの管理オーバーヘッドが増加するという問題もある[19]。静的に割り当てられた少数のキューを実装する場合に比べ、処理負荷が高く実装も複雑になるため、ユーザ端末である WN への適応的なキュー作成・削除機能を実装することは好ましくない。

さらに、Gambiroza らは、図 2-1 (b) に示した RS を介したマルチホップ無線ネットワークにおける同様の不公平性問題に対して取り組んでおり、図 2-6 に示すような、Transit Access Point (TAP) と呼ぶ RS 配下に WN が接続する無線のバックホール回線において、TAP 間の公平性を保つべく Inter-TAP Fairness Algorithm (IFA) を提案している[20]。IFA では、各 TAP が、自身の配下 WN からの生起トラフィック量と隣接 TAP との間のキャパシティ情報とを、属するマルチホップ経路上の TAP との間で交換し、当該交換情報を元にして公平性を保てるレートを計算する。計算結果に基づいて、配下 WN からのトラフィックを制限することで AP 間の公平性を保つ。ここで、IFA の導入に当たっては、TAP 間で情報交換するための専用メッセージの導入が必要になると

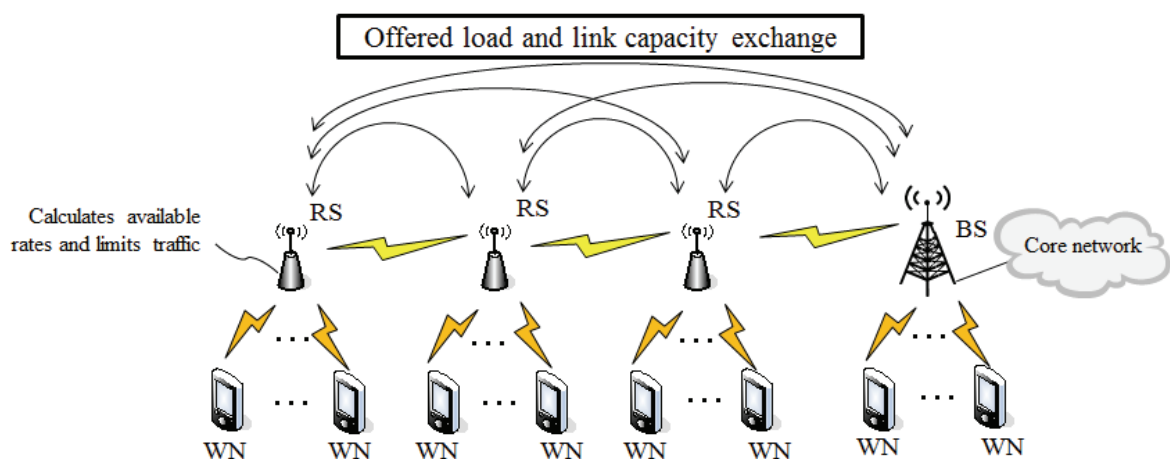


図 2 - 6 Inter-TAP Fairness Algorithm

Figure 2-6: Inter-TAP Fairness Algorithm

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

ともに、メッセージの交換頻度が、公平性とメッセージトラフィックオーバーヘッドとのトレードオフになるという問題がある。さらに、既存 MAC プロトコルの変更や新たな専用メッセージの導入は、インターオペラビリティの観点で不適である。

そこで、本章では、静的に割り当てる少数のキューを用い、新たなメッセージの導入や既存 MAC プロトコルへの変更を必要としない簡易なスケジューリングアルゴリズムで WN 間の公平性を向上させる提案手法を紹介する。

2.4 ユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング手法

提案スケジューリングアルゴリズムでは、各 WN は、Own-Traffic-Queue (OTQ), Uplink-Traffic-Queue (UTQ), Downlink-Traffic-Queue (DTQ)と呼ぶ三つのキューを有する。OTQ は、自身で生起するトラフィック用のキューである。また、UTQ は、他の WN から転送されるアップリンク方向 (BS 方向)のトラフィック用のキューである。DTQ は、他の WN もしくは BS から転送されるダウンリンク方向のトラフィック用のキューとなる。

WN のトラフィック制御機構を図 2-7 に示す。WN は、上述の三つのキュー、パケットをキューイングするキューマネージャ、パケットをスケジューリングするスケジューラに加え、他の WN から転送されたパケットがアップリンク方向のものかダウンリンク方向のものを判別するための経路表と、端末リスト (Node_List)を有する。端

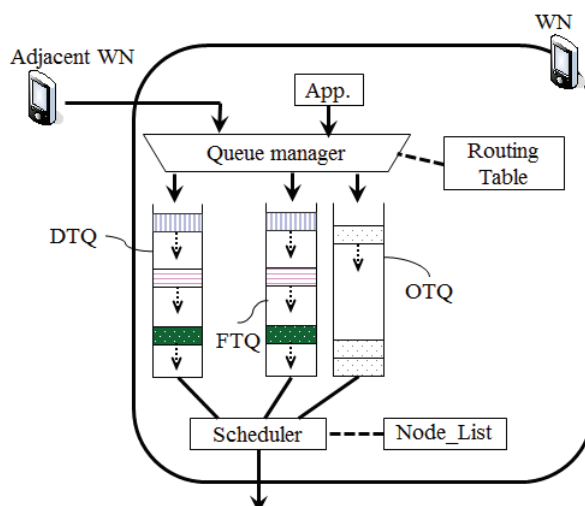


図 2-7 WN のトラフィック制御機構

Figure 2-7: Traffic control functions of WN

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

末リストについては後述する。

WN は、パケットを送信キューへ入れる際、つまり、自身でパケットを生起するか、隣接 WN からの転送パケットを受信すると、図 2 - 8 に示すアルゴリズムに従ってパケットをキューイングする。ここで、キューマネージャは、経路表等を参照してフローの方向を判別する。

WN は、これら 3 種類のトラフィックを区別してキューイングするとともに、パケットの送信元識別子に基づいてスケジューリングを行うことで、WN 間の公平性の向上を図る。

2.4.1 Own-Traffic-Queue と Uplink-Traffic-Queue 間のスケジューリング

本節では、提案手法の特徴となる OTQ と UTQ 間のスケジューリングアルゴリズムについて説明する。DTQ を含めたスケジューリング全体像は次節にて述べる。

提案アルゴリズムの基本的な考え方は、自身のアップリンクパケットを一つ送信するたびに、自身から見て BS と反対側のダウンリンク方向に接続されている WN のアップリンクパケットを一つずつ転送することで、公平性の向上を図るというものである。図 2 - 4 に示したマルチホップ無線ネットワークにおける WN1 に着目する場合、

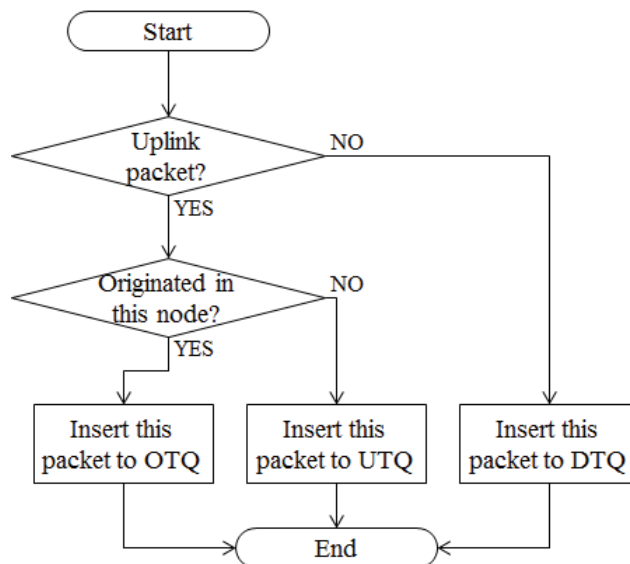


図 2 - 8 Queue Manager での処理

Figure 2-8: Process at queue manager

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

WN1 は自身のアップリンクパケットを一つ BS へ送信した後，WN2，WN3 及び WN4 からのアップリンクパケットをそれぞれ一つずつ BS へ送信するものである。

上記を実現するために，WN のスケジューラは端末リストを保持する．端末リストには，キューから出力されたパケットの送信元識別子を登録する．

図 2-9 に，OTQ と UTQ 間でどのようにパケットをデキューするかのアルゴリズムを示す．スケジューラは，OTQ もしくは UTQ からパケットをデキューする際，(1) OTQ にパケットがキューイングされているかを確認し，キューイングされている場合は，(2) OTQ の先頭パケットの送信元識別子（自身の識別子）が端末リストに登録されているかを確認する．登録されていない場合，(3) OTQ の先頭パケットを送出し，(4) 当該パケットの送信元識別子を端末リストへ登録する．OTQ の先頭パケットの送信元識別子が端末リストに登録されている場合は，(5) UTQ の先頭パケットの送信元識別子が端末リストに登録されているかを確認し，登録が無ければ，(6) UTQ の先頭パケットを送出した上，(4) 当該パケットの送信元識別子を端末リストへ登録する．両キューの先頭パケットの送信元識別子が端末リストに既に登録されている場合は，(7) 端末リスト内の全エントリをクリアし，再度，(1) OTQ の先頭パケットの送信元識別子と端末リストのチェックを行う．

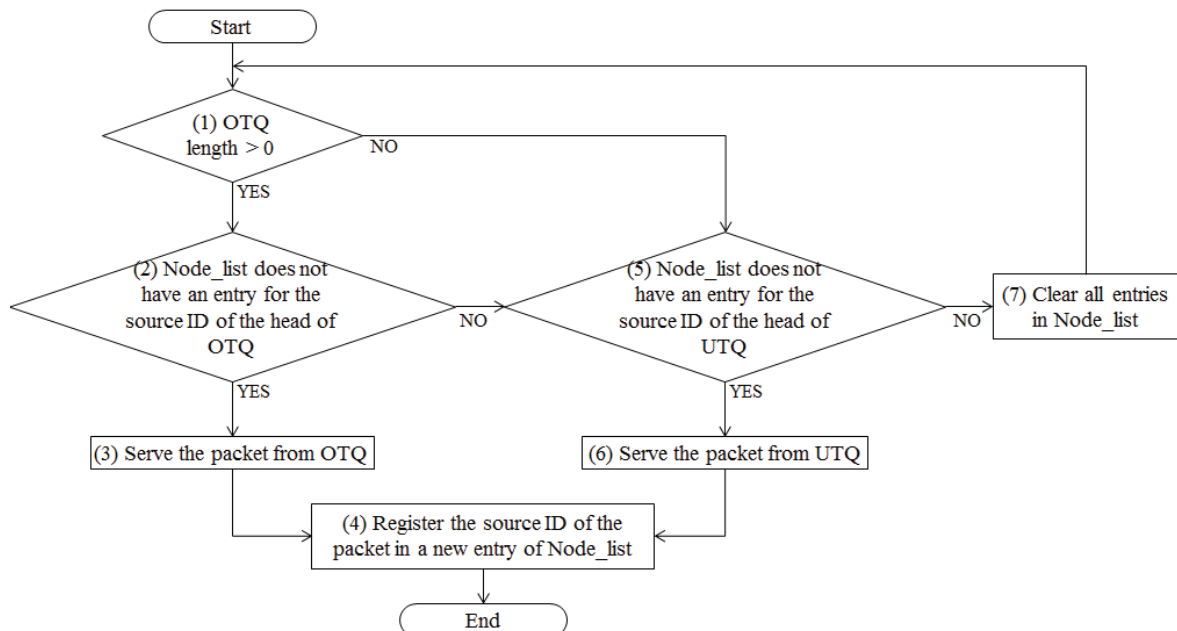


図 2-9 OTQ・UTQ 間のパケットデキュースケジューリング

Figure 2-9: Scheduling of dequeuing packet between OTQ and UTQ

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

図 2 - 4 と同条件のシナリオに，上記アルゴリズムを適用した場合の様子を図 2 - 10 に示す．図 2 - 10 において，WN1 に着目すると，まず時刻 T において，OTQ から自身で生じたパケットを送信し，端末リストに送信元識別子である"1"を登録する．続いて時刻 $3T$ において，OTQ の先頭パケットの送信元識別子である"1"が端末リスト

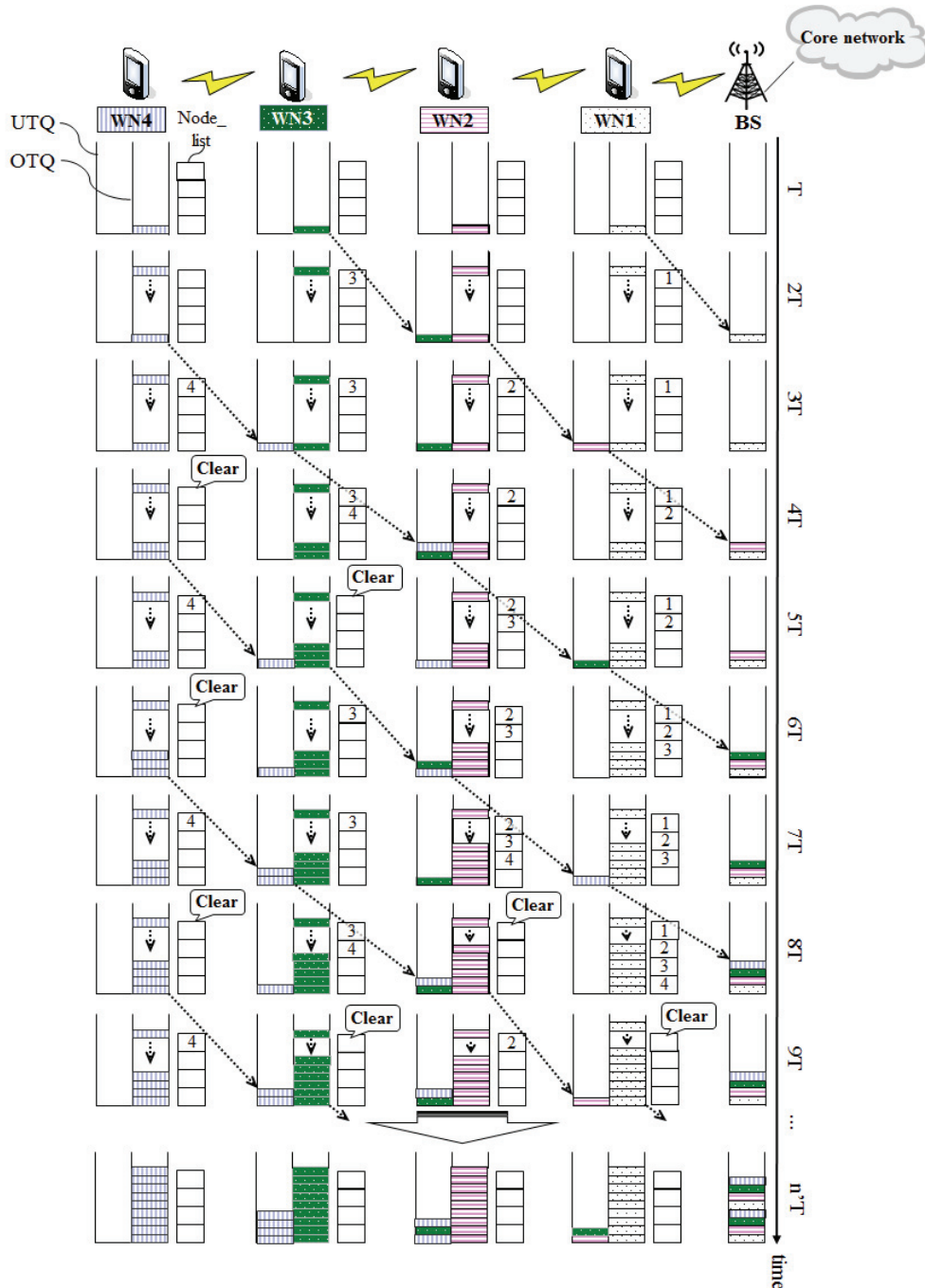


図 2 - 10 提案アルゴリズムによる OTQ・UTQ 間のスケジューリング動作概要

Figure 2-10: Operation of the scheduling between OTQ and UTQ in the proposed algorithm

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

に登録されており，UTQ の先頭パケットの送信元識別子である"2"が端末リストに登録されていないため，UTQ からパケットを送信し，端末リストに"2"に登録する．同様に，時刻 $5T$ ， $7T$ において，それぞれ，送信元識別子が"3"のパケット，"4"のパケットをいずれも UTQ から送出し，端末リストに"3"，"4"に登録する．時刻 $9T$ になると，OTQ の先頭パケットの送信元識別子である"1"及び UTQ の先頭パケットの送信元識別子である"2"のいずれもが端末リストに登録されているため，端末リストをクリアし，OTQ からパケットを送信する．

このように，提案アルゴリズムでは，自身で生起したアップリンクパケットを一つ送信するたびに，ダウンリンク側に接続されている WN からのアップリンクパケットを一つずつ転送しようとするすることで，図 2 - 10 に示すように，各 WN から BS へ到達するパケット数の公平性が向上する．

2.4.2 Downlink-Traffic-Queue を含むスケジューリング

2.4.1 に記載のスケジューリングアルゴリズムは，アップリンクトラフィックの公平性を目的としている．一方，実際はダウンリンクトラフィックも混在し，2.4.1 の手法のままでは意図した効果を得ることは難しいため，ダウンリンクトラフィックを区別して扱うべく DTQ を導入する．本章では，アップリンクトラフィックフローを収容する OTQ，UTQ を仮想的に単一キューとみなし，その仮想キューと DTQ に Round-robin スケジューリングを適用する．その仮想キュー内においては，2.4.1 で述べた図 2 - 9 に示すスケジューリングアルゴリズムに従ってスケジューリングを行う．

2.5 シミュレーション評価

本章では，コンピュータシミュレーションによる提案スケジューリングアルゴリズムの性能評価について述べる．

2.5.1 シミュレーション条件

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

ネットワークシミュレータ *ns-2* [21]を用いて、提案手法と従来手法を、主にアップリンクスループットの観点から比較評価した。ここでは、従来手法として以下の二つの手法を評価し、2.3に記載の、端末処理負荷の高い既存手法2や、新規メッセージ導入が必須となる IFA は比較評価対象外とした。

- ・ 通常手法 (Normal scheme) : WN が一つの FIFO キューのみを保持するもの
- ・ 既存手法 (Existing scheme) : 2.3 に記載の既存手法1で、静的な重みで重み付け Round-robin を行うもの

また、以下では、既存手法における自身のトラフィック用のキューを OTQ、転送トラフィック用のキューを FTQ と呼ぶ。

本評価では、図 2 - 1 (a)に示した WN 間の無線マルチホップと、同(b)に示した RS を介した無線マルチホップの2種類の形態におけるシナリオで評価を実施した。ベースとなる無線通信システムには、オリノコ製の IEEE802.11b を想定したパラメータセット[22]による無線 LAN システムを用いた。つまり、無線 LAN AP を BS とし、また、RS を介した無線マルチホップのシナリオでは、有線回線を有さない無線 LAN AP が RS となる。

2.5.2 無線端末間無線マルチホップシナリオ

2.5.2.1 静的配置による評価

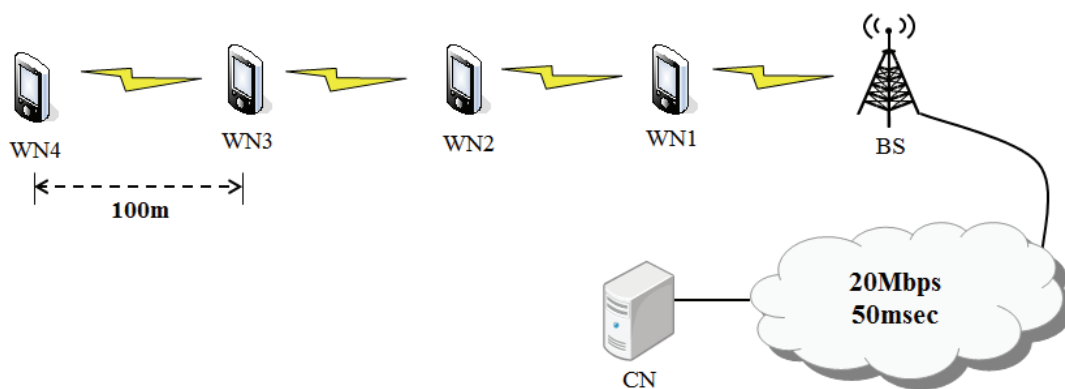


図 2 - 11 WN 間無線マルチホップシナリオの WN 静的配置におけるネットワークトポロジ

Figure 2-11: Network topology of the static WN deployment in the inter-WN multi-hop scenario

表 2 - 1 シミュレーションパラメータ (WN 間マルチホップシナリオ)
Table 2-1: Simulation parameters (Inter-WN multi-hop scenario)

Parameter	Value
Transmission range (m)	160
Channel rate (Mbit/s)	11
Max retry times	7
Space between nodes (m)	100
Packet size (Byte)	1000
Queue size (packet)	140 (Normal scheme) 140 (OTQ:20, FTQ:120) (Existing scheme) 140 (OTQ:20, UTQ:60, DTQ:60) (Proposed scheme)
Simulation time (sec.)	180

まず，図 2 - 11 に示すように，WN を静的に配置して，基礎的な評価を行った．各 WN の通信相手である Correspondent Node (CN) は，20Mbit/s の帯域と 50ms の遅延を有するバックボーンネットワークを介して有線リンクで BS と接続している．その他のシミュレーションパラメータを表 2 - 1 に示す．

(1) アップリンク CBR トラヒックを用いた評価

最初に，各 WN が CN へ Constant Bit Rate (CBR) アプリケーションを用いて，UDP トラヒックを送信する際の，スループット，遅延時間，及び WN 間のそれらの変動係数 (Coefficient of Variation: CoV) を測定した．送信レートは表 2 - 2 に示すように，50 ~ 1,500Kbit/s の範囲で変化させた．各 WN におけるパケット生起タイミングに関して，WN 間で送信タイミングが同期して異常な振る舞いにならぬよう，パケットサイズ及び送信レートから導き出されるパケット生起タイミングに， $[-0.5, +0.5]$ の一様乱数を乗じた値を実際のパケット生起タイミングとした．

ここで，スループットとは，いわゆるグッドプットを指し，エンド間のアプリケーションレベルのスループットのことである．また，CoV は，以下のように，標準偏差 $\sqrt{\sigma^2}$ を平均 \bar{x} で割ったものを百分率で表したものである．

表 2 - 2 CBR 送信レート
Table 2-2: CBR transmission rate

Parameter	Value
UL offered load (Kbit/s)	50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1500

$$CoV = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\bar{x}} * 100 [\%] \tag{2-1}$$

つまり、CoV 値が小さいほどデータのばらつきが小さいことを意味し、各 WN のスループット間の CoV 値が小さいほど、WN 間のスループットの差異が小さいといえる。

また、既存手法に関し、OTQ と FTQ 間で Round-robin スケジューリングを行う際の重みを、OTQ:FTQ = 1:2 とした。これは、各 WN におけるトラフィック負荷 (CBR 送信レート) を 1000 Kbit/s とした状況下において、OTQ に対する FTQ の重みを 1~10 の範囲で 1 ずつ変化させたところ、重みが 2 の場合が最もスループット間の CoV が小さくなった、つまり、WN 間のスループット公平性が高くなったためである。この際の結果を図 2 - 12 に示す。よって、以降の既存手法における CBR を用いたシミュレーションでは、Round-robin スケジューリングを行う際の重みは 2 とした。

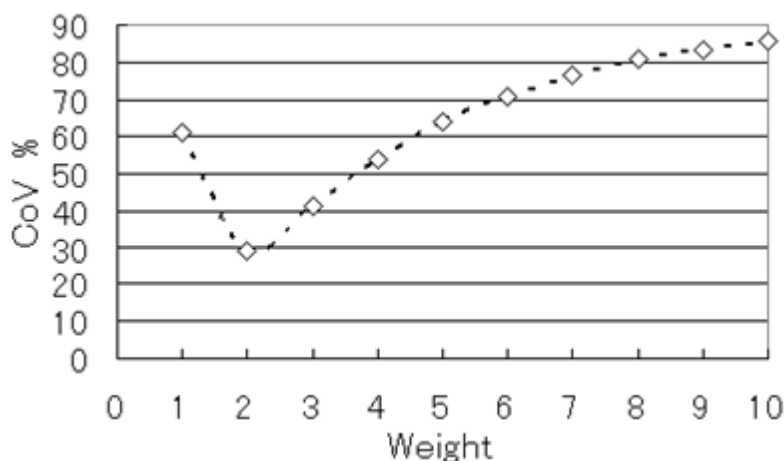


図 2 - 12 既存手法における Round-robin スケジューリング時の重みとスループットの CoV (CBR トラフィック時)

Figure 2-12: Relation between 'weight' of weighted round-robin scheduling and CoV in throughput in the existing scheme. (CBR traffic case)

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

① スループット評価結果と考察

通常手法, 既存手法及び提案手法における各 WN のアップリンクトラフィック負荷と,

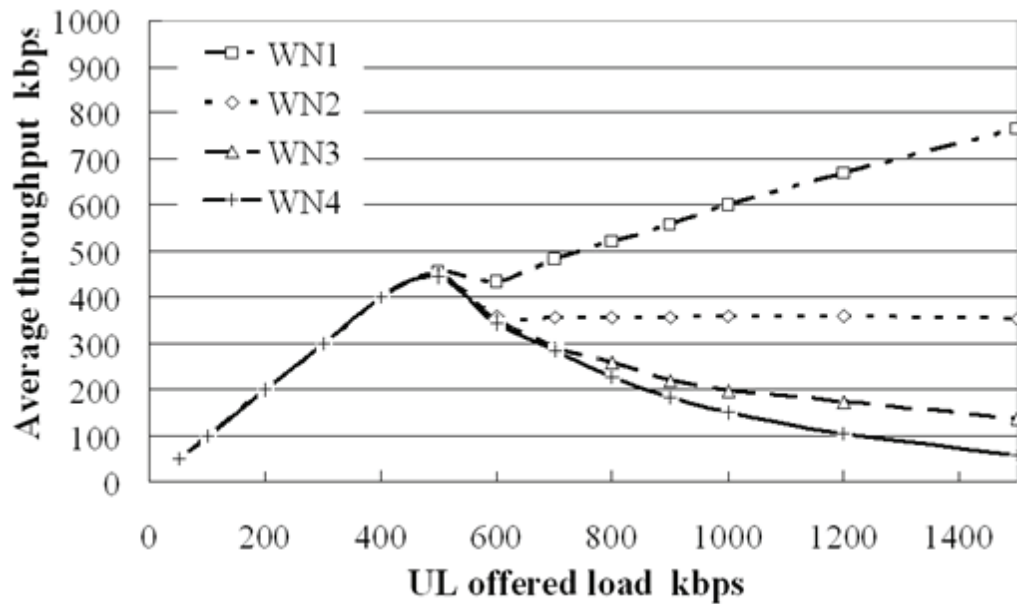


図 2 - 13 通常手法におけるトラフィック負荷とスループット

Figure 2-13: Relation between uplink offered load and throughput in the normal scheme

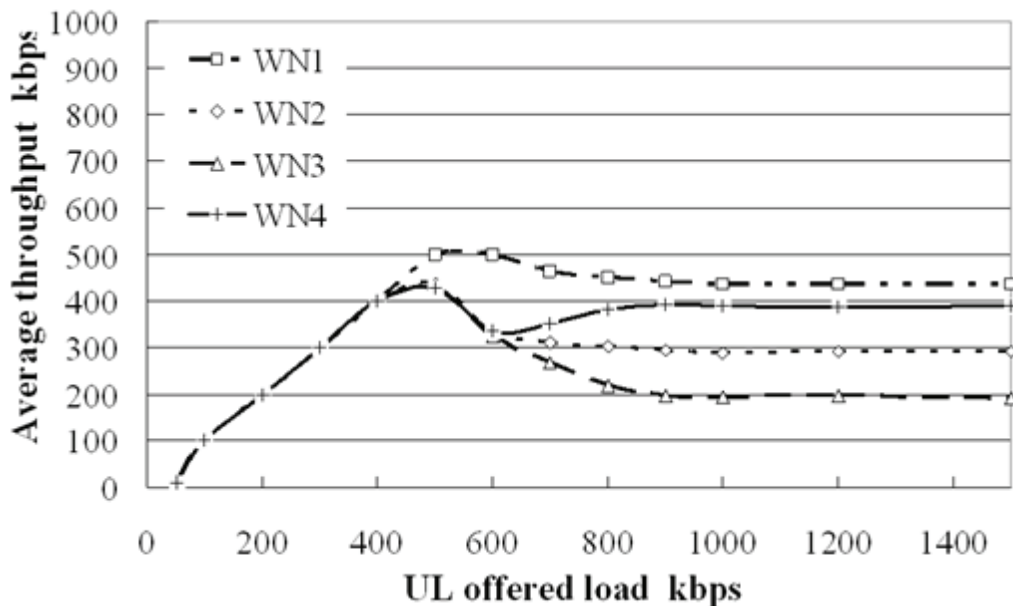


図 2 - 14 既存手法におけるトラフィック負荷とスループット

Figure 2-14: Relation between uplink offered load and throughput in the existing scheme

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

各 WN の平均スループットの関係をそれぞれ図 2 - 13, 図 2 - 14, 図 2 - 15 に示す.

通常手法では, トラフィック負荷が小さいうちは WN 間の公平性が保たれているものの, トラフィック負荷が増加するに従って, BS からのホップ数の大きい WN ほどスループットが大きく低下していることが分かる. このことから, マルチホップ無線ネットワークにおける WN 間の公平性の問題は, 生起トラフィックが WN の利用可能なネットワークリソースを上回り, WN 内のバッファでパケット破棄が発生する場合に起こると考えられる. 既存手法は, 図 2 - 14 から, 通常手法と比較すると, トラフィック負荷が増加しても WN 間の公平性が向上していることが分かる. しかし, BS からのホップ数が 4 (BS から最も遠い)である WN4 のスループットが, 同 3 の WN3 及び同 2 の WN2 よりも, それぞれ約 2 倍, 約 1.5 倍と, 高い結果となった. これは, WN4 では転送トラフィックが無く, 常に自身のトラフィックを送信できるのに対し, WN4 のトラフィックを転送する WN2 や WN3 では, 転送トラフィック 2 に対して自身の生起トラフィックを 1 の割合でしか送信できないためであると考えられる. このように, 既存手法は, 通常手法と比較すると WN 間の公平性向上が確認できるものの, WN 間でのスループット差は依然大きいことが分かる.

一方, 提案手法では, 図 2 - 15 から分かるように, トラフィック負荷が増加しても WN 間の公平性が高く保たれ, 通常手法や既存手法と比較すると, 公平性が大きく向

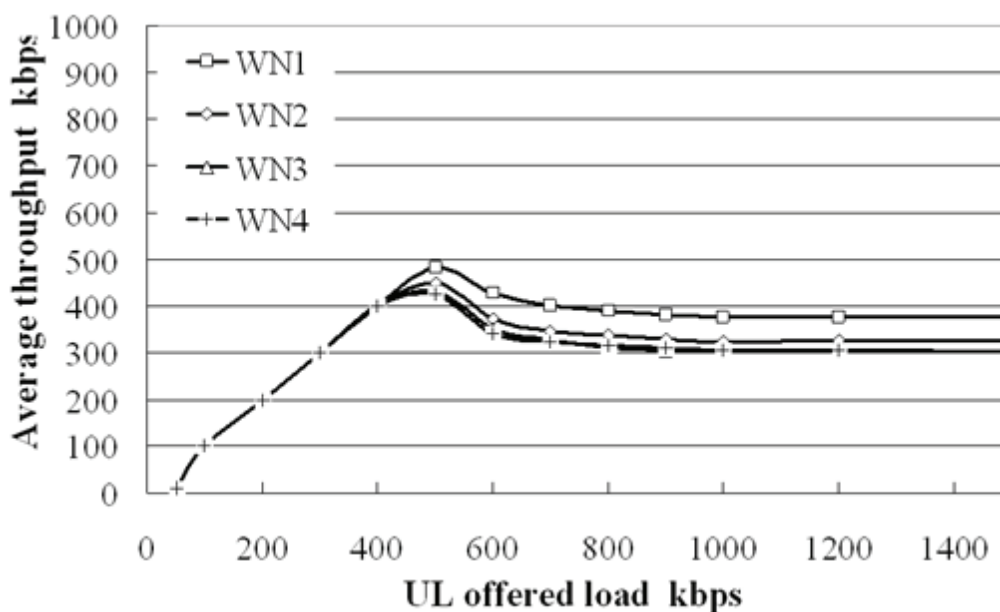


図 2 - 15 提案手法におけるトラフィック負荷とスループット

Figure 2-15: Relation between uplink offered load and throughput in the proposed scheme

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

上していることが分かる。各 WN のスループットが完全に一致しないのは、MAC プロトコルとして CSMA/CA を用いており、各 WN が決まった順番で送信機会を得るのではなく、自律分散的に送信機会を得ていることが原因だと考えられる。例えば、UTQ が空の WN3 において、WN4 が送信機会を得る前に WN3 が 2 回連続して送信機会を得たとすると、送信元識別子が WN3 であるパケットを連続して WN2 へ送信することとなり、この場合 WN3 は WN4 より高いスループットを得ることとなる。

図 2-16 は、各手法における、トラフィック負荷と WN 間のスループットの CoV につ

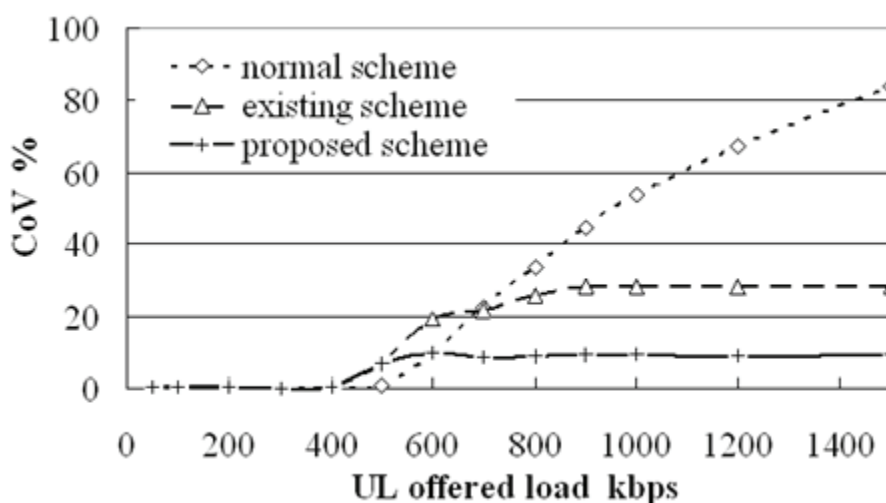


図 2-16 WN 間のスループットの CoV

Figure 2-16: Relation between uplink offered load and CoV in throughput among WNs

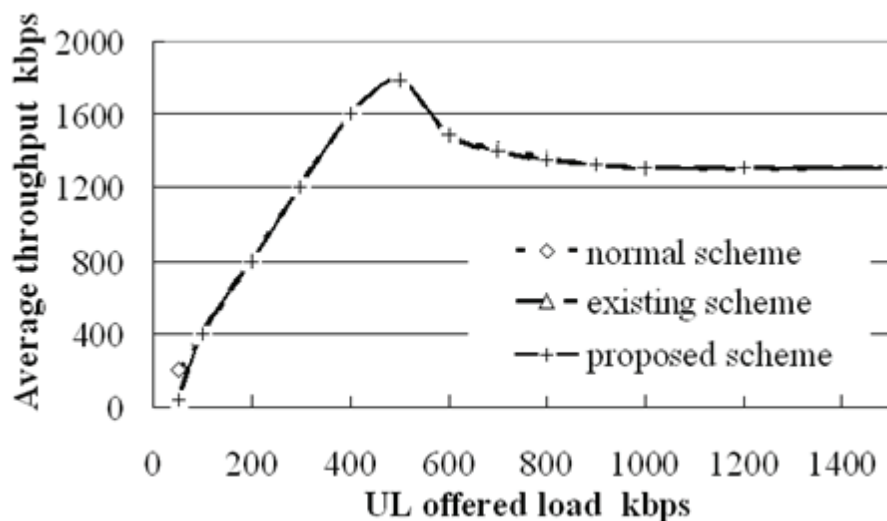


図 2-17 トータルスループット

Figure 2-17: Aggregate throughput

表 2 - 3 各 WN における平均遅延時間

Table 2-3: Average delay of each WN

Scheme	(msec)			
	WN1	WN2	WN3	WN4
Normal	902.8	1713.9	2623.5	3793.6
Existing	400.7	1473.8	2545.1	3473.2
Proposed	455.4	872.2	1326.1	1977.2

いて示したものである。図 2 - 16 から、提案手法を用いることで、トラフィック負荷が増加しても WN 間の公平性が保たれ、通常手法、既存手法と比較して、WN 間の公平性が大きく改善していることが分かる。

また、図 2 - 17 は、それぞれの手法におけるトラフィック負荷と全 WN のスループットを合計したトータルスループットとの関係を示したものである。図 2 - 17 より、提案手法を用いてもキャパシティは低下していないことが分かる。これは、提案手法では、MAC プロトコルへの変更は行っておらず、送信機会の獲得等は通常手法と同一だからである。なお、図 2 - 17 によれば、トラフィック負荷が 500 [Kbit/s] 付近でトータルスループットのピークを迎えているが、このあたりが最も無線リソースを効率よく使用できていることを意味し、ここよりトラフィック負荷が小さい場合は無線リソースが余っている一方、ここよりトラフィック負荷が大きい場合はパケット衝突による再送が増え、無線リソースの利用効率が低下するものと考えられる。

② 遅延時間スループット評価結果と考察

トラフィック負荷が 1,000Kbit/s の時の各手法における各 WN の平均遅延時間を表 2 - 3 に示す。いずれの手法でも、ホップ数が増加するほど遅延時間も増大している。ここで、通常手法の遅延時間が全体的に大きくなっているが、手法間におけるキュー長の違いが大きく影響している可能性が考えられるため、アップリンクトラフィック用のキュー長を等しくして再度シミュレーションを実施した。この際のキュー長は、通常手法で 40 packets, 既存手法で OTQ, FTQ それぞれ 20 packets ずつ、提案手法で OTQ, UTQ それぞれ 20 packets ずつである。CBR トラフィックを用いた本評価ではアップリンクトラフィックのみが発生し、ダウンリンクトラフィックは発生しないことから、提案手

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

法の DTQ は利用されない。再シミュレーションの結果である，各 WN のアップリンクトラフィック負荷と WN 間の遅延時間の CoV の関係を図 2 - 18 に示す。

図 2 - 18 より，通常手法は WN が一つのキューしか保持しないことから，トラフィック負荷が増加するに従い，転送トラフィックが転送先の WN の生起トラフィックの影響で待たされるため，他の 2 手法と比較してホップ数による遅延の影響が強く出ており，CoV が高くなっている。一方，既存手法においては，転送トラフィックが転送先の WN の生起トラフィックとは別のキューにキューイングされて転送されるため，転送先 WN の生起トラフィックの影響で待たされることなく，通常手法と比較すると CoV が低く抑えられており，WN 間の遅延時間の差異が減少していることが分かる。ここで，図 2 - 18 の既存手法において，トラフィック負荷が 500Kbit/s の場合の CoV が突出して大きくなっているが，トラフィック負荷を 500Kbit/s の周囲で変更したところ，トラフィック負荷が 400Kbit/s や 600Kbit/s の場合の CoV と近い値となったことから，500Kbit/s の結果は偶然特異な値をとったといえる。

提案手法に関しては，アップリンクトラフィック負荷量に依らず，他の 2 手法と比較して CoV が低く抑えられており，WN 間の遅延時間差が最も小さい。これは，提案手法においては転送トラフィックが転送先の WN の生起トラフィックとは別にキューイングされて転送されていることに加え，キューの先頭パケットの送信元識別子を端末リストと照らし合わせ，近い過去において送出されていない送信元識別子を持つパケットを優先的に送出して公平性を高めた結果だといえる。以上より，提案手法を用いる

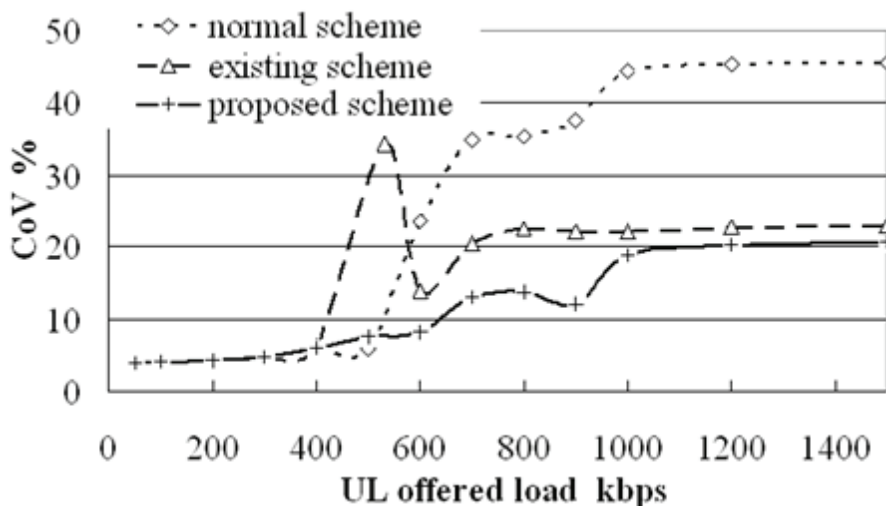


図 2 - 18 WN 間平均遅延時間の CoV

Figure 2-18: Relation between uplink offered load and CoV of average delay among WNs

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

表 2 - 4 TCP スループット及び CoV 結果

Table 2-4: TCP throughput and CoV

Scheme	(kbps, %)				
	WN1	WN2	WN3	WN4	CoV
Normal	512.3	306.6	298.9	293.2	26.1
Existing	321.2	326.8	321.0	315.7	1.2
Proposed	397.8	323.5	312.0	304.0	11.1

ことで、遅延時間に関しても公平性が向上することが確認できた。

(2) FTP トラフィックを用いた評価

続いて、各 WN が、CBR ではなく FTP をアプリケーションに用いた場合の評価を行った。各 WN が、十分大きなファイルを FTP により CN へ送信する際の、スループット及び各 WN のスループット間の CoV を測定した。TCP のバージョンには TCP Tahoe を用い、FTP は ns-2 で提供されるアプリケーションを用いた。また、各 WN 及び CN が、FTP により十分大きなファイルをそれぞれ CN 及び各 WN へ双方向に送信する際のスループットについても測定した。

既存手法において、OTQ と FTQ 間の Round-robin スケジューリングで用いる重みは、OTQ:FTP = 1:6 とした。これは、2.5.2.1 (1) の CBR トラフィック評価と同様、OTQ に対する FTQ の重みを 1~10 の範囲で 1 ずつ変化させたところ、重み 6 の場合が最も WN 間の公平性が高くなったためである。一方、提案手法においては、OTQ と UTQ を一つのキューとみなす仮想キューと DTQ 間で Round-robin スケジューリングを行う際の重みは、仮想キュー:DTQ = 1:5 とした。これも同様に、重みを変化させた際の結果を受けたものである。これらの結果を図 2 - 19 に示す。以降の既存手法及び提案手法の FTP を用いたシミュレーションでは、これらの重みを用いることとする。

① スループット評価結果及び考察

各 WN による CN への FTP アップロード時の、それぞれの手法における各 WN のスループットを表 2 - 4 に示す。通常手法では、WN1 と WN2~4 間でスループットの大きな差異が見られたが、一方で WN2~4 の間ではほぼ同様のスループットとなった。

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

表 2 - 5 双方向FTP トラフィック時の CoV

Table 2-5: Throughput CoV under bi-directional FTP flows (%)

Scheme	CoV (Uplink)	CoV (Downlink)
Normal	18.5	28.6
Existing	39.3	25.2
Proposed	3.4	20.9

これは、WN1 がボトルネックとなり、WN2~4 間で同様の輻輳制御が働いたためと考えられる。既存手法に関しては、WN 間の公平性が非常に高い結果となった。これは、OTQ と FTQ 間の Round-robin スケジューリングの重みにより、WN1 のトラフィックが WN1 内に適切な時間待たされることで、WN1 がボトルネックにならなかったためと考えられる。WN 間のスループットの CoV も非常に低いことは表 2 - 4 及び図 2 - 19 からもわかる。一方、図 2 - 19 から、既存手法は Round-robin スケジューリングの重みに敏感であり、最適値からの離れると急激に公平性が劣化することが分かる。提案手法においては、通常手法よりは公平性が向上しているが、既存手法ほど向上はしなかった。これは、CBR トラフィックの場合と同様、各 WN が自律分散的に送信機会を得ており、その結果、WN1 が WN2~4 に対して若干ボトルネックになっているためと考えられる。

続いて、表 2 - 5 に、各 WN と CN 間で双方向の FTP トラフィックを流した場合の、

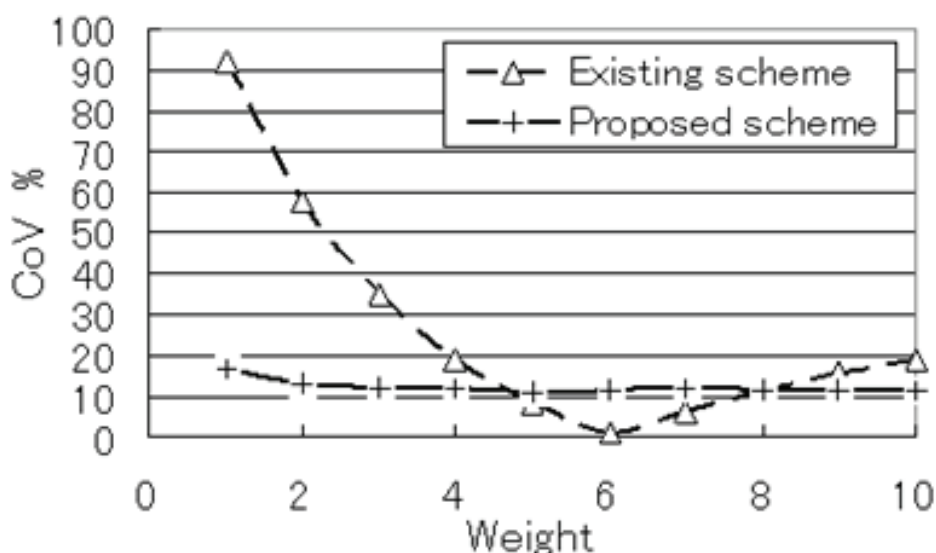


図 2 - 19 Round-robin スケジューリング時の重みとスループット CoV
Figure 2-19: Relation between weight in the round-robin scheduling and CoV of throughput

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

各手法におけるアップリンク,ダウンリンクそれぞれのスループットの CoV を示す. 双方向通信時でも,提案手法を用いることで,特にアップリンク側の公平性が大きく改善していることが分かる.これは,2.4.1 で述べた OTQ と UTQ 間のスケジューリングが有効に機能していることを意味する.一方,既存手法では,表 2-4 の片方向 FTP トラヒック時の結果に比べて WN 間の公平性が大きく低下した.これは,既存手法では,アップリンクトラヒック及びダウンリンクトラヒックがともに FTQ へキューイングされ,区別なくスケジューリングされるためだと考えられる.

2.5.2.2 ランダム配置による評価

続いて,1,000m×300m のフィールドの隅に BS を配置し,ランダムに 10 台の WN を配置して評価を実施した.2.5.2.1 では,図 2-11 に示すような,WN の静的配置による基礎的な評価を行ったが,実際のマルチホップ無線ネットワークでは,より複雑なトポロジになると考えられることから,本評価を実施した.

直接,もしくは他の WN 経由で BS と接続できない WN は,再度ランダムに配置され,全 WN が BS までの通信経路を確立できるまで WN の再配置が繰り返される.BS をフィールドの隅に配置するのは無線マルチホップ接続を発生しやすくするためである.また,BS までの経路は,アドホックネットワークにおけるテーブル駆動型の代表的なルーティングプロトコルである Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) [23]を用いて構築した.

各 WN が CBR アプリケーションを用いて,表 2-2 に示すように 50~1,500Kbit/s の

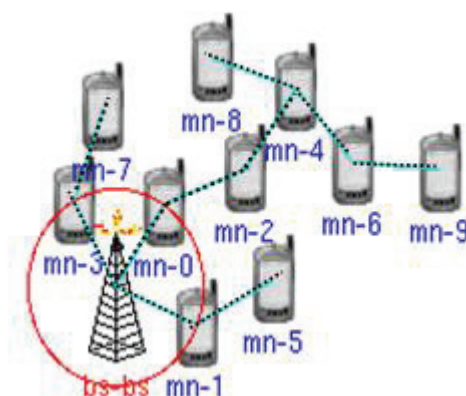


図 2-20 ランダム配置時のネットワーク構成の一例

Figure 2-20: An example of network topology under random placement of WNs

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

間で送信レートを変化させて UDP トラフィックを CN へ送信する際の、マルチホップツリーごとのスループットの CoV を求め、それらツリーごとの CoV の平均値をさらに求めた。ここでは、それぞれ 100 回ずつシミュレーションを実施した。図 2-20 にランダム配置したネットワーク構成の一例を示す。ただし、図 2-20 では CN は省略してある。なお、各回のシミュレーションにおいて、それぞれの手法に対するネットワークトポロジは同じである（同一トポロジの元、各手法を適用した）。

① スループット評価結果及び考察

図 2-21 に、各マルチホップツリーの平均 CoV の通常手法に対する提案手法の比率を示す。図 2-21 の x 軸は、シミュレーションの回数（計 100 回）を表している。y 軸である CoV 比が 1 の場合、通常手法と提案手法の平均 CoV 値が同一であることを意味し、CoV 比が 1 未満の場合は、提案手法の平均 CoV 値が通常手法より小さい（つまり WN 間のスループットの公平性が高い）こと、逆に CoV 比が 1 より大きい場合は、提案手法の平均 CoV 値が通常手法より大きい（つまり WN 間のスループットの公平性が低い）ことを意味する。また、図 2-22 に、各マルチホップツリーの平均 CoV の既存手法に対する提案手法の比率を示す。

図 2-21 より、100 回の試行全てにおいて、提案手法は通常手法に比べて WN 間の公平性が改善されていることが分かる。100 回の試行における CoV 比の平均値は 0.58 であった。一方、図 2-22 より、提案手法は通常手法と比較しても WN 間の公平性が改善されていることが分かる。100 回の試行における CoV 比の平均値は 0.90 であった。しかしながら、100 回の試行のうち 21 回は、既存手法が提案手法よりも WN 間の公平性改善度合いが高かった。これより、提案手法は通常手法に対しては大幅な WN 間公平性の改善が見込めるが、既存手法に対しての効果の度合いは、ネットワーク構成に依存するものといえる。

2.5.3 中継局間無線マルチホップシナリオ

図 2 - 23 に示すような RS 間で無線マルチホップツリーを構成するネットワークに

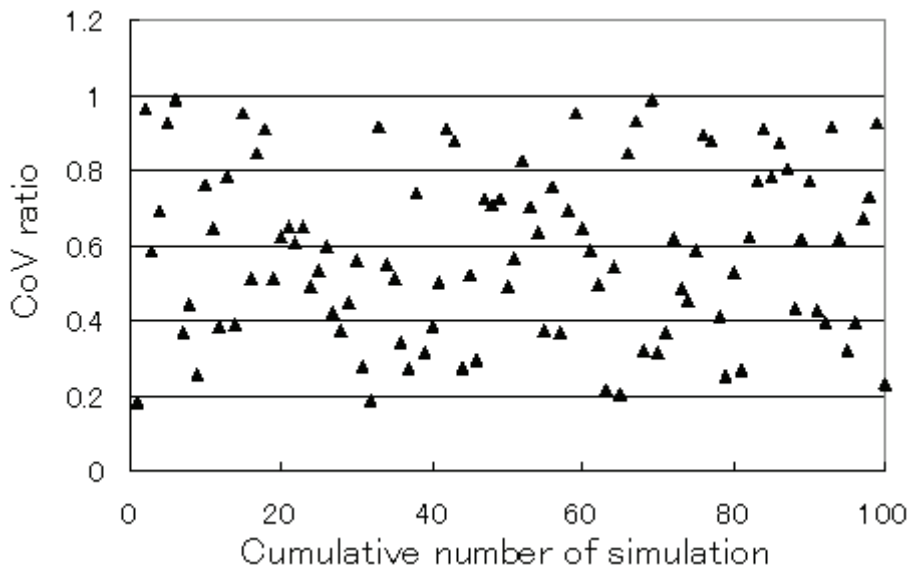


図 2 - 21 通常手法に対する提案手法の CoV 比
Figure 2-21: CoV ratio of proposed scheme to normal scheme

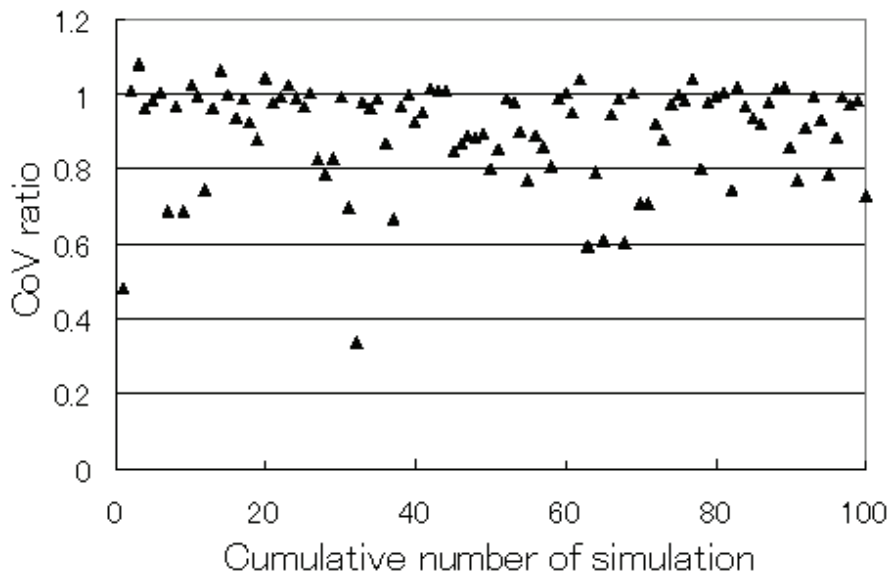


図 2 - 22 既存手法に対する提案手法の CoV 比
Figure 2-22: CoV ratio of proposed scheme to existing scheme

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

における RS に提案アルゴリズムを適用した場合を考える．ここで，**2.5.1** に記載したように，本評価では無線 LAN AP を BS とし，また，有線回線を有さない無線 LAN AP を RS とした．RS は，**2.5.2** の WN と同様に，OTQ, UTQ, DTQ の 3 種類のキューを保持し，自身に直接接続している WN からのトラフィックを OTQ へキューイングし，隣接 RS からの転送トラフィックを，そのトラフィックの方向に従って UTQ 及び DTQ へキューイングする．パケットを送信する際は，**2.4** で述べたスケジューリングアルゴリズムに従ってパケットスケジューリングを行う．

各 RS には，図 2-23 に示すように 2 台ずつ WN が接続した．また，RS 間と RS-WN 間では異なる無線チャネルを用いた．表 2-6 にその他のシミュレーションパラメータを示す．各 WN が CN へ，表 2-2 に示す 50~1,500Kbit/s の送信レートで CBR トラフィックを送信する際のスループットを測定した．

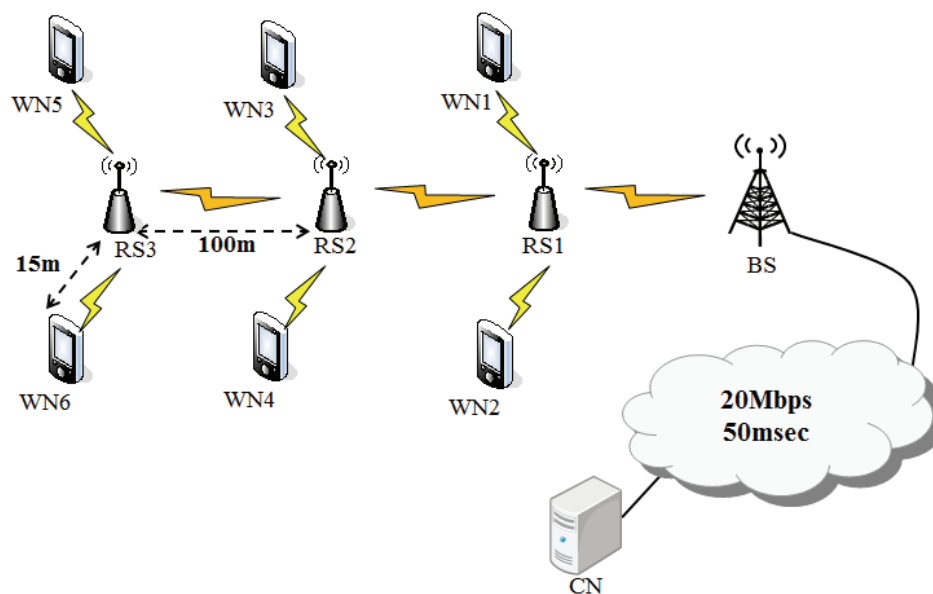


図 2 - 23 RS 間マルチホップシナリオにおけるネットワークトポロジ

Figure 2-23: Network topology in the scenario of inter-RS multi-hop network

表2-6 シミュレーションパラメータ (RS 間マルチホップシナリオ)

Table 6: Simulation parameters (Inter-RS multi-hop scenario)

Parameter	Value
Transmission range of AP (m)	160
Transmission range of WN (m)	22.5
Channel rate (Mbps)	11
Max retry times	7
Space between RSs (m)	100
Space between RS and WN (m)	15
Packet size (Byte)	1000
Queue size of AP (packets)	140 (Normal scheme) 140 (OTQ:20, FTQ:120) (Existing scheme) 140 (OTQ:20, UTQ:60, DTQ:60) (Proposed scheme)
Simulation time (sec)	180

通常手法，既存手法及び提案手法を用いた際の，各 WN の平均スループットを，それぞれ図 2 - 24，図 2 - 25，図 2 - 26 に示す．2.5.2 の WN 間マルチホップシナリオの結果と同様，通常手法では，BS からのホップ数の大きい RS に接続する WN ほどスループットが低下した．一方，既存手法では，RS3 に接続する WN (WN5, 6) のスループットが最も高くなった．これは，RS3 では転送トラヒックが存在せず，常に自身に接続する WN のトラヒックを送信できているためである．図 2 - 26 から，提案手法を用いることで，公平性が大きく改善することが分かる．これにより，提案するスケジューリングアルゴリズムは，RS 間でマルチホップツリーを構成する場合にも効果があることが分かった．

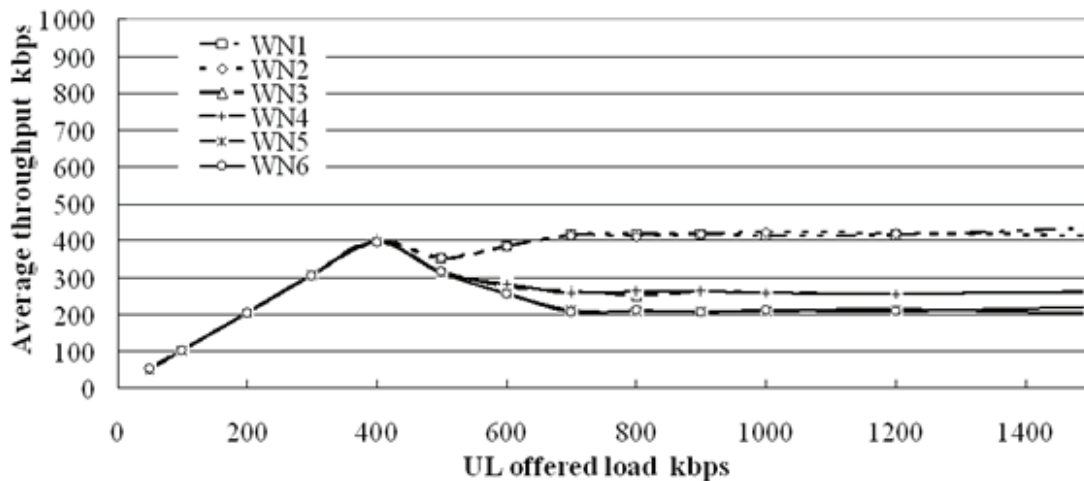


図 2 - 24 通常手法におけるスループット (RS 間マルチホップシナリオ)

Figure 2-24: Relation between uplink offered load and throughput in normal scheme (Inter-RS multi-hop scenario)

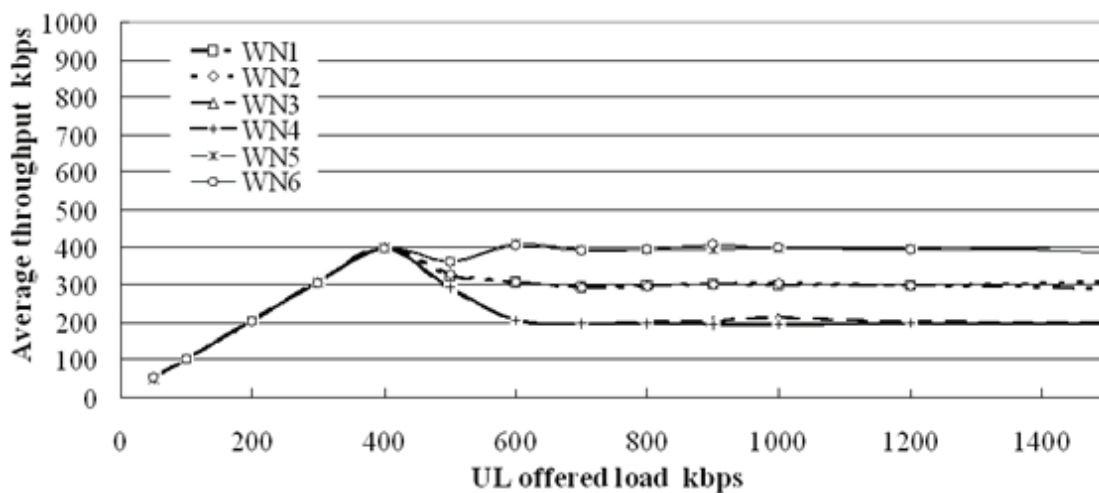


図 2 - 25 既存手法におけるスループット (RS 間マルチホップシナリオ)

Figure 2-25: Relation between uplink offered load and throughput in existing scheme (Inter-RS multi-hop scenario)

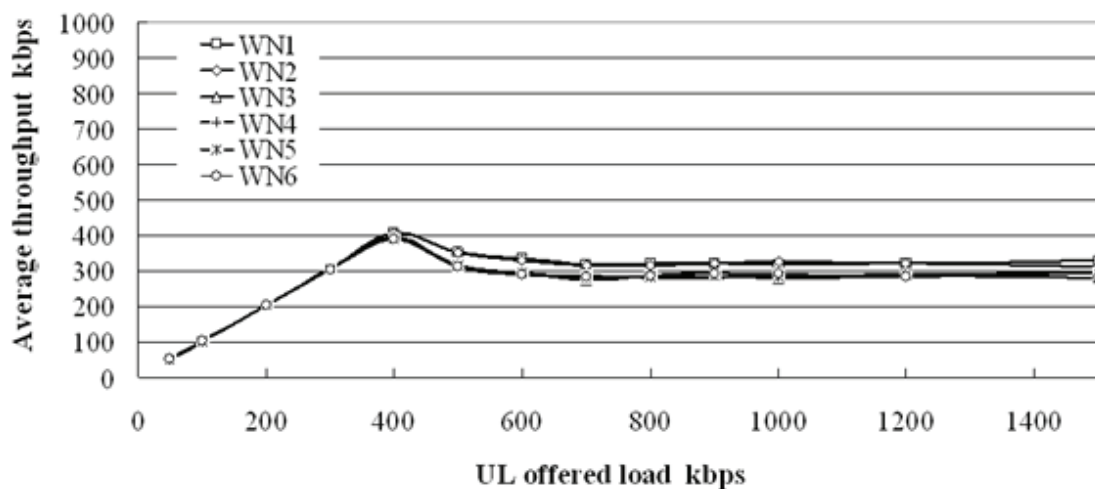


図 2 - 26 提案手法におけるスループット (RS 間マルチホップシナリオ)

Figure 2-26: Relation between uplink offered load and throughput in proposed scheme (Inter-RS multi-hop scenario)

2.6 まとめ

本章では、無線端末間や中継局間の無線中継を用いることで通信エリア拡張が可能なマルチホップ無線ネットワークにおいて、基地局からのホップ数の異なるユーザ間でスループットに差異が生じる問題を改善するためのスケジューリングアルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは、専用シグナリングメッセージの導入や既存 MAC プロトコルの変更が不要であり、シンプルな仕組みで動作するものである。コンピュータシミュレーションを用いた性能評価の結果、提案アルゴリズムによりユーザ間のスループット差異が大きく減少することを確認するとともに、ネットワークトポロジにロバストであることを示した。また、中継局間の無線マルチホップネットワークへ適用した場合も、提案アルゴリズムが有効に機能することを確認した。

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

本章ではまず、異種無線ネットワークの特徴を説明する。その後、異種無線ネットワークにおいて接続先システムを切り替えるバーチカルハンドオーバ処理に必要な三つのステップ「異種無線ネットワーク探索」、「異種無線ネットワーク選択」、「異種無線ネットワーク切り替え」について述べる。各ステップのうち、特に探索ステップと切り替えステップについて、既存研究や提案手法を含めて紹介した後、異種無線ネットワーク切り替えステップとして、テレビ電話等の双方向リアルタイムアプリケーションを対象に、アプリケーションレベルでシームレスにバーチカルハンドオーバを実施するハンドオーバ手法を提案する。最後に、提案するハンドオーバ手法に対し、テストベッドを用いた性能評価結果を紹介する。

3.1 異種無線ネットワーク

昨今のモバイル通信の発展に伴い、様々な種類の無線ネットワークが出現している。これら無線ネットワークは、カバレッジの広さを基準に、無線 Wide Area Network (WAN)、無線 Metropolitan Area Network (MAN)、無線 Local Area Network (LAN)、無線 Personal Area Network (PAN)、無線 Body Area Network (BAN)と分類分けされることが多い。一方、高速な通信速度を特長とするネットワーク、無線端末のバッテリー寿命延伸を最大の目的とするネットワーク等、カバレッジ以外の特徴も様々である。さらに、回線交換 (Circuit switching: CS)方式による通信を提供するネットワーク、パケット交換 (Packet switching: PS)方式によるパケット通信を提供するネットワーク等、交換方式による違いもある。

単一のネットワークで全ての要求・用途をカバーするためには莫大なコストが必要となることから、複数の無線ネットワークを相互補完させる異種無線ネットワークが考案された[6]。このような異種の無線ネットワークを自在に利用可能な環境の出現を背景として、同一の端末で複数の無線ネットワークへアクセス可能なマルチモード端末 (図3-1)が既に数多く市場に出ており、その場所や用途に応じて最適な無線ネットワークを利用することが可能となっている。

このような異種無線ネットワークでは、利用する無線ネットワークを切り替えるバーチカルハンドオーバ (Vertical handover)と呼ぶ処理が重要となる。バーチカルハンドオーバは、その実行トリガの状況によって以下の2通りに分類できる。

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

- ① **緊急ハンドオーバ (Urgent handover):** 利用中の無線ネットワークのカバレッジ内に位置するなどにより、利用中の無線ネットワークの通信リンク切断が予測される、もしくは実際に切断された場合 (図3-2(a)参照)
- ② **非緊急ハンドオーバ (Non-urgent handover):** 利用中の無線ネットワークのカバレッジ内であり、そのまま通信継続できるものの、アプリケーションやユーザの意向により、よりよい無線ネットワークへの切り替えを要求される場合 (図3-2(b)参照)

緊急ハンドオーバに関しては、できるだけ早く異なる無線ネットワークへバーチカルハンドオーバを実施することが求められ、これ以外の選択肢はない。一方、非緊急ハンドオーバに関しては、以下の三つのフェーズを経てバーチカルハンドオーバが実施される。

- (1) 異なる無線ネットワークの探索フェーズ
- (2) 接続先無線ネットワークの選択フェーズ
- (3) 接続先無線ネットワーク切り替えフェーズ

図3-3は、バーチカルハンドオーバが行われる場合を例示したものであり、移動端末 (Mobile node: MN)は最初モバイル WiMAX に接続しているものとする。図3-3のAの位置でMNは受信電力低下等によりリンク切断を予測し、緊急に他の無線ネットワーク (本例ではセルラ)へのバーチカルハンドオーバを実施する。これが上記①緊急ハンドオーバに当たる。一方、無線LANエリアに入る図3-3のBの位置はセルラエリア内であり、接続中のセルラリンクが切断される訳ではない。しかし、例えばよ



図3-1 マルチモード端末

Figure 3-1: Multi-mode terminal that supports several wireless networks

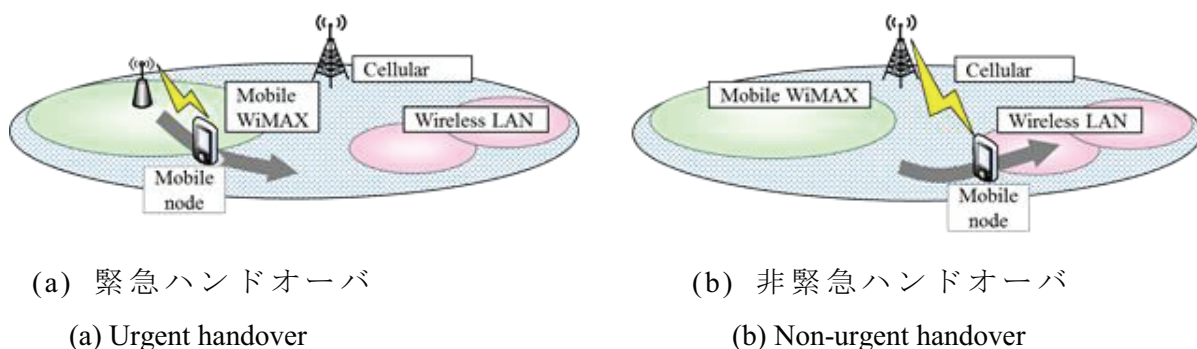


図3-2 緊急ハンドオーバと非緊急ハンドオーバ

Figure 3-2: Urgent handover and non-urgent handover

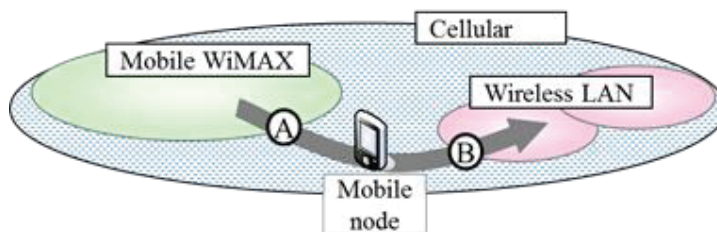


図3-3 バーチカルハンドオーバ

Figure 3-3: Vertical handover

り高速なアクセスをユーザが所望する場合，無線LANへバーチカルハンドオーバすることが好ましい．これが上記②非緊急ハンドオーバに当たる．この場合，まず無線LANのエリアを検知し（フェーズ(1)），その後セルラに接続したままでいるか無線LANに切り替えるかを判断する（フェーズ(2)）．無線LANへ切り替えるべきと判断した場合，実際に無線LANネットワークへのバーチカルハンドオーバを実施する（フェーズ(3)）．本章では②の非緊急バーチカルハンドオーバに焦点を当て，特にフェーズ(1)と(3)について既存手法の課題を解決する提案を行う．

3.2 異種無線ネットワーク探索

一般的に，MNはバッテリー駆動のため，消費電力削減は最も優先度の高い要求事項である．基地局（Base station: BS）やアクセスポイント（Access point: AP）に未接続の状態では，表3-1に示すように非通信状態であっても送受信時に近いレベルの非常

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

表 3 - 1 無線 LAN とセルラの各状態と GPS の消費電力[24][25]

Table 3-1: Power consumption in each state of Wireless LAN and cellular systems and GPS [24][25]
(mW)

	Power consumption
Wireless LAN: Idle (PSM ON)	414.4
Wireless LAN: Send/Receive	1086.4
Wireless LAN: Not connected	1015.1
Cellular: Idle	27.4
Cellular: Send/Receive (voice)	1063.8
GPS: Acquisition mode (fully active)	69

に多くの電力が消費されてしまう [24][25] ため、接続中でない通信インタフェースを普段はパワーオフもしくはスリープモードにしておき、適切なタイミングで起動してネットワーク (BS や AP) を探索することが重要となる。なお、セルラシステムや無線 LAN の Power Saving Mode (PSM) における間欠受信技術など、待ち受け中の消費電力を抑制する仕組みはあるが、これらは BS や AP に接続して初めて機能するものであり、BS や AP に未接続の状態では期待した省電力効果は得られない。ここでは、セルラに代表される無線 WAN に接続中に、無線 MAN や無線 LAN 等よりカバレッジの狭い無線ネットワークを探索することを考える。

3.2.1 従来手法

最も基本的な手法は、一定間隔で無線 MAN や無線 LAN の通信インタフェースを起動してネットワーク探索をするものであるが、短い起動間隔は消費電力の増大に繋がり、一方で、長い起動間隔ではネットワーク発見が遅れることになるというトレードオフが存在する。そこで、Lee らは無線 WAN (セルラ) と無線 LAN の通信インタフェースを有する MN を対象に、Power-efficient Communication Protocol (PCP) を提案した [26]。PCP では、無線 LAN インタフェースは通常非アクティブとなる。MN 宛の大容量のデータ (ビデオ等) がセルラの無線ネットワーク制御装置 (Radio network controller: RNC) に到着すると、RNC が BS 経由でセルラのページングチャネルを用いて MN の無線 LAN インタフェースを起動し、MN に無線 LAN AP のサーチを実施させる。接続可能な無線 LAN AP が見つかり、MN が無線 LAN ネットワークに接続すると、

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー

当該データは RNC から無線 LAN システムへ送られ、無線 LAN 経由で MN へダウンロードされる。PCP は通常無線 LAN インタフェースを非アクティブにしている点で消費電力に優れる。しかし、無線 LAN AP サーチの結果、接続可能な無線 LAN AP が周囲に見つからない場合は、無線 LAN インタフェースを再度非アクティブにすることになるため、無線 LAN AP サーチに要した電力が無駄になる。さらに、セルラシステムと無線 LAN システムを密に連携させる必要があるとともに、セルラシステム内の装置 (RNC, BS) のプログラムを変更しなければならない。セルラ事業者と無線 LAN 事業者が異なる場合、このような密な連携の実現ハードルは高く、また、セルラシステムの装置の変更には大きな改修を伴うため、実現は難しいといえる。

また、MIRAI アーキテクチャ[27]では、リソースサーバと呼ばれるネットワーク内のサーバが各無線ネットワークのカバレッジと MN の位置情報を保持し、当該情報を元に MIRAI サーバと呼ばれる別のサーバが MN へセルラ経由でハンドオーバー指示を出すことで、必要な時だけ無線 LAN の通信インタフェースを起動することが可能となる。同様に、Ylianttila らは、無線 LAN カバレッジ情報と MN の位置情報をネットワーク上のサーバが保持し、それら情報に基づいたバーチカルハンドオーバーを実施する、GPS ベースの位置認識バーチカルハンドオーバー手法を提案した[28]。MN は通常、セルラインタフェースのみを起動しているが、サーバが MN による無線 LAN エリアへの進入を検知したら、セルラシステム経由で無線 LAN インタフェースを起動するものである。さらに、Kutscher らは、同様の情報に加え、利用可能サービス等の情報が、ブロードキャストによって、もしくは MN からの要求によって MN に配信され、当該情報に基づいて MN がバーチカルハンドオーバーを実施する仕組みを提案している[29]。標準化団体においても、メディア非依存の HO をサポートする IEEE802.21 において、Information Service (IS) という同様のアプローチが策定された[30]。さらに、3GPP においても、Evolved Packet System (EPS) への同様の要求が策定された[31]。

しかしながら、上記サーバが保持する無線 LAN カバレッジ情報は、例えば無線 LAN AP の設置場所の所定半径以内をカバレッジとするなど、静的なものであるが、実環境における電波の飛び方は、建物等の周囲の環境によって大きく異なる。よって、実際はカバレッジエリアではないのに、サーバによる無駄な無線 LAN インタフェース起動が繰り返される恐れがある。また、無線 LAN AP の設置、撤去は容易であることから、サーバ上のカバレッジ情報の更新頻度が低いと、誤った無線ネットワーク切り替え判断が増加し、探索すべきところでインタフェース起動トリガがかからない、インタフェース起動トリガがかかったが接続先ネットワークが見つからない、などの異種無線ネットワーク探索の失敗が増えるという課題もある。

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー

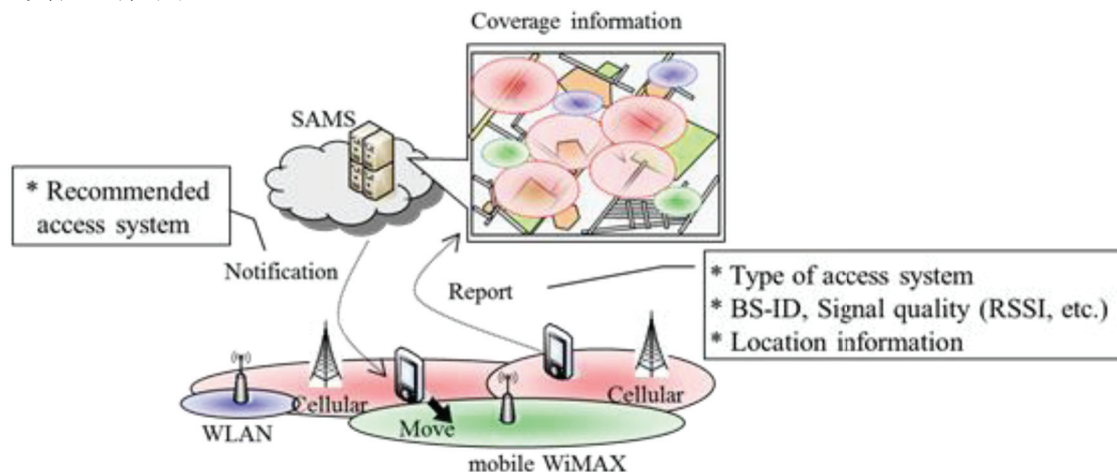


図 3 - 4 サービスエリアマップサーバ(SAMS)を用いたバーチカルハンドオーバー
Figure 3-4: Vertical handover using Service Area Map Server (SAMS)

3.2.2 カバレッジ情報を活用した異種無線ネットワーク探索

3.2.1 より，異種無線ネットワーク探索に係る要求条件は以下の二つであるといえる。

- (R1) 通常は複数の通信インタフェースを同時にアクティブにしない
- (R2) 誤った通信インタフェース起動トリガによる異種無線ネットワーク探索失敗数を減らす

そこで，筆者は，両要求条件を満たす異種無線ネットワーク探索手法を提案している [32][33]。提案手法は二つの手法から成る。一つ目はカバレッジ情報の動的作成であり，二つ目は MN の無線 LAN インタフェースを起動するトリガに関する手法である。本手法では，ネットワーク上にサーバサービスエリアマップサーバ (Service Area Map Server: SAMS) を導入し，SAMS を用いた効率的なバーチカルハンドオーバーを実現する (図 3 - 4)。

3.2.2.1 カバレッジ情報の動的作成

要求条件(R2)を満たすべく，本手法では，MN から，「無線システム種別，BS/AP 識別子，電波情報(電波強度 (Received signal strength Indicator: RSSI)等)，位置情報」

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

からなるサービスエリア情報を SAMS へ送信することで、SAMS にて実状に即したカバレッジ情報を蓄積する。サービスエリア情報は、例えば以下である（それぞれ、無線システム種別、MAC アドレス、SSID、RSSI、周波数バンド、緯度、経度、高度）。

Wi-Fi, 12:34:56:ab:cd, WasedaUni, -91, 2442, 35.706, 139.707, 15.2

これらサービスエリア情報は定期的に MN から収集することも可能であるが、二つの課題がある。一つは通知が SAMS へ集中し、SAMS の処理負荷が高まることである。もう一つの課題は MN の消費電力である。サービスエリア情報を収集するには、GPS レシーバを起動するなどして位置情報を取得する必要があるが、定期的な測位はその分電力を消費することとなる。

また、図 3 - 5 ([34])に示すように、一般的にユーザは空間的に一様に存在している訳ではない。ターミナル駅と住宅街では明らかに行き交うユーザ数が異なる。サービスエリア情報の定期収集頻度を落とすと、ユーザ数が相対的に少ないエリアの情報が集まらなくなり、逆に定期収集頻度を上げると上述した課題の影響が大きくなってしまう。

そこで、提案手法では、サービスエリア情報を収集するトリガとして以下の二つの条件を付加した。

条件①: SAMS が収集対象エリアを選定し、当該エリア内の MN のみがサービス

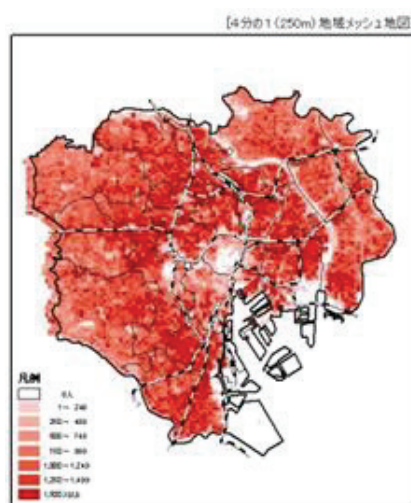


図 3 - 5 東京都区部における昼間人口の地理的分布[34]

Figure 3-5: Geographical distribution of population in the daytime [34]

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー

エリア情報を収集する

条件②: 対象となる無線システムの電波情報が所定範囲の場合のみサービスエリア情報を収集する

条件①は、SAMSでカバレッジ情報を構築するのに十分なサービスエリア情報を収集できていないエリアをSAMSが抽出し、当該エリアでのみMNにサービスエリア情報を収集させるものである。ここで、「エリア」は緯度・経度情報でなくてよく、例えば対象エリアをカバレッジに含むようなセルラBSの識別子(BSID)でもよい。

条件②は、無線LAN等の狭域無線ネットワークの情報は通信品質の良好な場所のみの情報を、セルラ等の広域無線ネットワークの情報は通信品質の劣化した場所のみの情報を、それぞれ収集するなど、各無線ネットワークの特徴を生かした情報取得によりエリア情報作成の効率化を図るものである。条件②にて定義される情報収集範囲の例を図3-6に示す。図3-6では、無線LANとモバイルWiMAXに関しては、RSSIが閾値 $Th2$ 以上の場合のみサービスエリア情報を収集し、セルラについては、RSSIが閾値 $Th1$ 以下の場合のみ、サービスエリア情報を収集するとしている。

図3-7に、本手法におけるMNの動作概要を示す。MNは、SAMSから測定情報(Measurement information)を受け取る。この測定情報には、条件①に関する収集対象エリア情報と、条件②に関する収集対象電波情報が記載されている。本測定情報は、ブロードキャスト(Multimedia broadcast/multicast service: MBMS)で配信されることが好ましい。MNは接続先BSIDを記録し、条件①に該当すれば、次の処理へ移る。

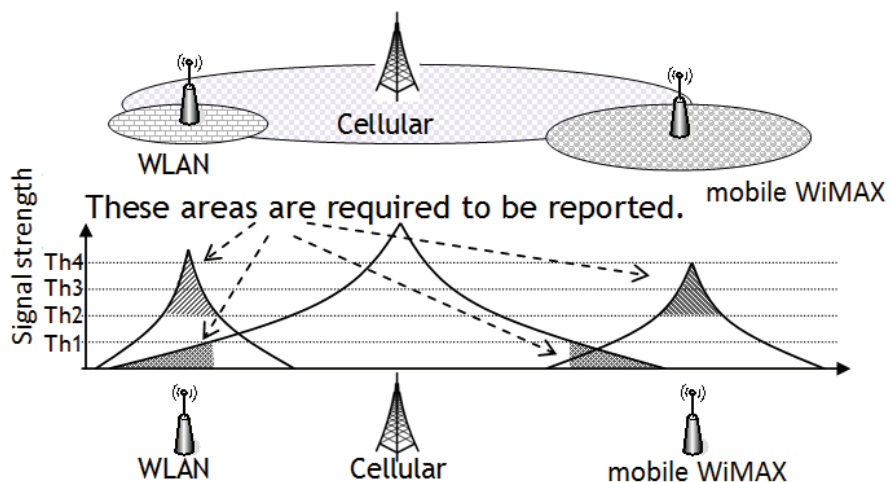


図3-6 対象システムごとの情報収集条件

Figure 3-6: Reporting trigger that differs according to target systems

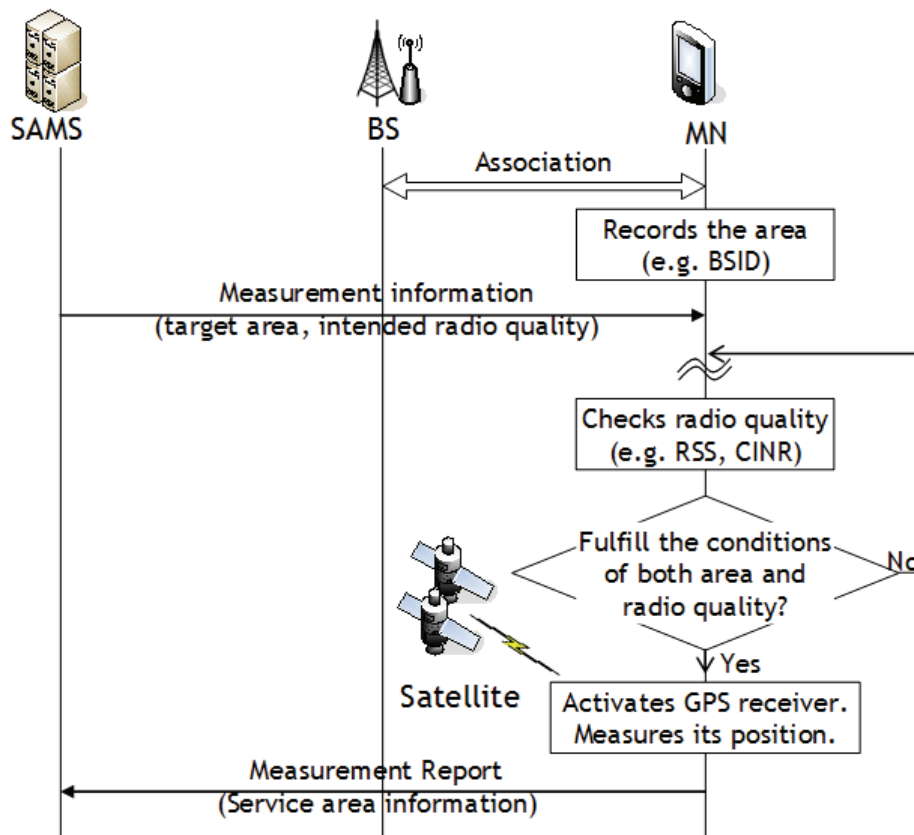


図 3 - 7 MN の動作概要

Figure 3-7: Operation in MN

条件①に該当しない場合は，移動等により接続先 BSID が変わるまで何もしない．条件①に該当する BS に接続している場合，信号品質 (RSSI 等)を確認する．信号品質が条件②に該当している場合は，GPS を起動するなどして測位を行い，サービスエリア情報を SAMS へ送信する．

3.2.2.2 カバレッジ情報を用いたネットワーク探索

続いて，前節で構築した SAMS でのカバレッジ情報を用いたネットワーク探索手法について述べる．本手法は，3.2.1 で述べた既存手法同様の処理となる．通常は一つの通信インタフェース (例えばセルラ)のみ起動して，他のインタフェースは非アクティブにすることで，3.2.2 に記載の要求条件(R1)を満たすようにする．本手法の処理の流れを図 3 - 8 に示す．ユーザによる通信がセルラインタフェースを利用して開始されると，MN は位置情報と現在利用している通信システム (図 3 - 8 の場合セルラ)

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー

を付加したクエリを SAMS へ送る。当該クエリを受信した SAMS は、カバレッジ情報を検索し、他に利用可能な通信システムが無いかチェックする。ほかに利用可能な通信システムがある場合、利用可能アクセスシステムリスト (Available access system list)として MN へ通知する。図 3 - 8 では、利用可能システムとして無線 LAN があり、ユーザまたは利用アプリが無線 LAN への切り替えを望む場合は、無線 LAN インタフェースを立ち上げて無線 LAN AP へ接続し、ネットワーク切り替えを実施する。

3.2.2.3 カバレッジ情報を用いたネットワーク探索システムの試作とフィールド評価

提案手法を Windows XP を OS とする PC に実装し、簡単な評価を実施した。本実装及び評価では、通信システムとしてセルラと無線 LAN を利用した。試作したシステム構成を図 3 - 9 に示す。

MN の機能はノート PC 上に実装した。ノート PC には、PC カードタイプの GPS 受

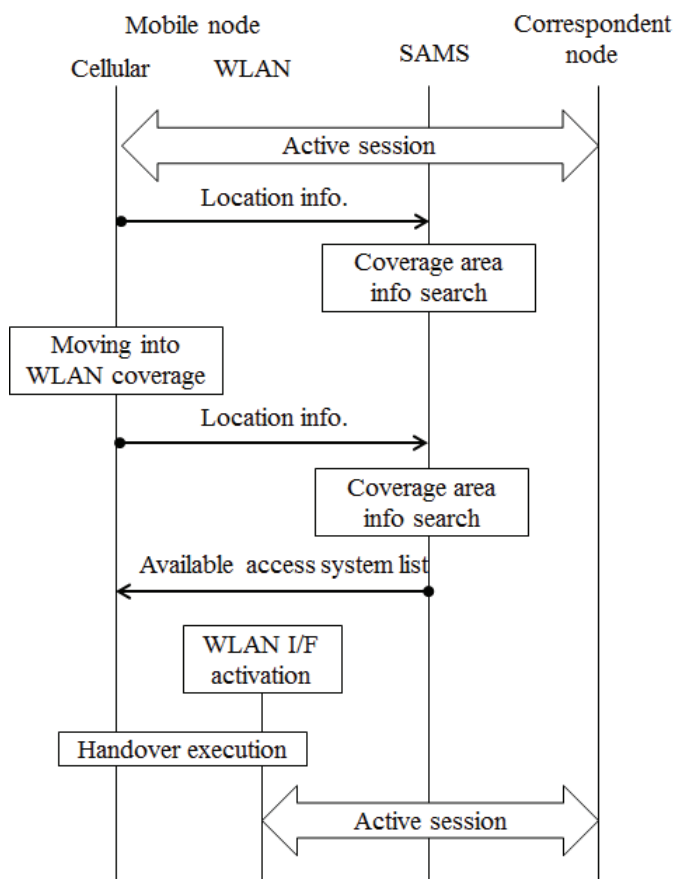


図 3 - 8 カバレッジ情報を用いたインタフェースの起動
Figure 3-8: Interface activation trigger using coverage area information

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチャルハンドオーバ

表 3 - 2 試作した MN の諸元
Table 3-2: Specification of prototyped MN

	Power consumption
Laptop PC	OS: Windows XP SP.2 CPU: PentiumM 1.6GHz Mem: 1.0GB
WLAN1	IEEE802.11b/g (Built into the PC)
WLAN2 (WLAN signal measurement)	IEEE802.11a/b/g/n (AirPcap; PCMCIA)
GPS receiver	Compact Flash GPS Receiver
Cellular system	CDMA2000 1xEV-DO compliant

信機，USB 経由で接続されたセルラ端末，無線 LAN の信号をキャプチャする AirPcap[35]と AirPcap が動く PC カードタイプの無線 LAN，通信用のビルトイン無線 LAN が備わっている．諸元を表 3 - 2 に示す．なお，SAMS はデスクトップ PC に実装した．

試作システムを用いて，図 3 - 10(a)に示す環境にて簡単な実験を行った．図 3 - 10(a)は俯瞰図であり，4 階建ての鉄筋コンクリート製のオフィスビルの 1 階の窓際に無線 LAN AP が 1 台設置してある．

まず，サービスエリア情報の収集のため，図 3 - 10(a)の矢印上を，MN を持ちなが

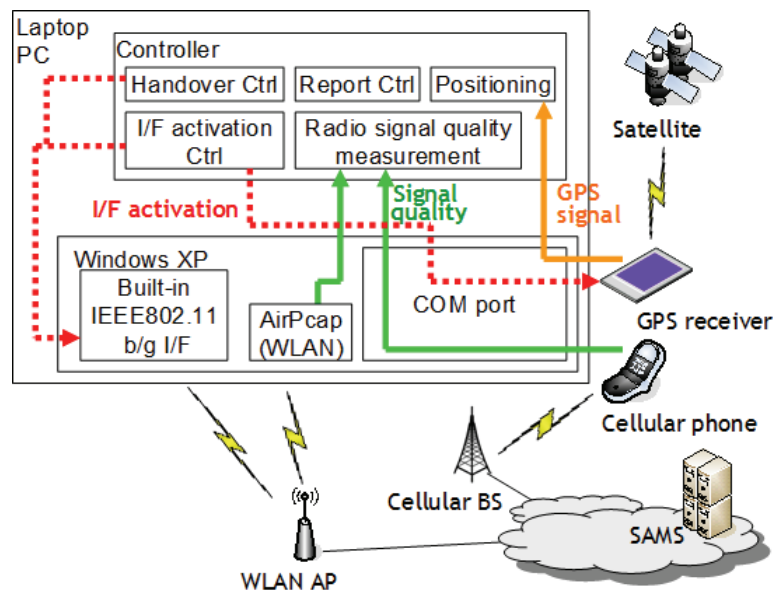


図 3 - 9 試作システム構成

Figure 3-9: Prototype system

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

ら徒歩で数往復したところ、50弱のサービスエリア情報が SAMS に収集された。SAMS にて収集されたデータを図 3 - 10(b)に示す。図 3 - 10(b)では、無線 LAN の情報を三角形で、セルラの情報をはし形で示している。3.2.2.1 に記載したように、提案手法においては、無線 LAN の情報は RSSI が所定閾値以上の場合、セルラの情報とは所定閾値以下の場合のみ、それぞれ収集対象となるため、図 3 - 10(b)ではセルラの情報も 1 点のみとなった。つまり、その他の場所では十分な品質のセルラ通信が実施できることを意味している。なお、サービスエリア情報の収集経路上における実際の無線 LAN カバレッジエリアは、図 3 - 10(b)の「Area-A」として示すエリアであるが、GPS 測位誤差の影響で測位結果が散らばっていることが分かる。

続いて、無線 LAN インタフェースを非アクティブにした状態で同経路を歩行し、SAMS を用いたネットワーク探索の実験を実施した。全 7 回試行し、そのうち 6 回、図 3 - 10(b)の「Area-A」にて無線 LAN インタフェースを起動することに成功した。6 回のうちの 1 回は、Windows XP 標準の無線 LAN 探索アプリケーションにて、対象無線 LAN AP を発見できなかったため、無線 LAN AP 接続には失敗したものの、残り 5 回は無線 LAN AP への接続も成功した。7 回のうち 1 回は、図 3 - 10(b)の「Area-B」の場所で無線 LAN インタフェースを起動してしまった。この原因は、「Area-B」にて測位した際の測位誤差により、「Area-A」付近にいるような通知が SAMS になされ

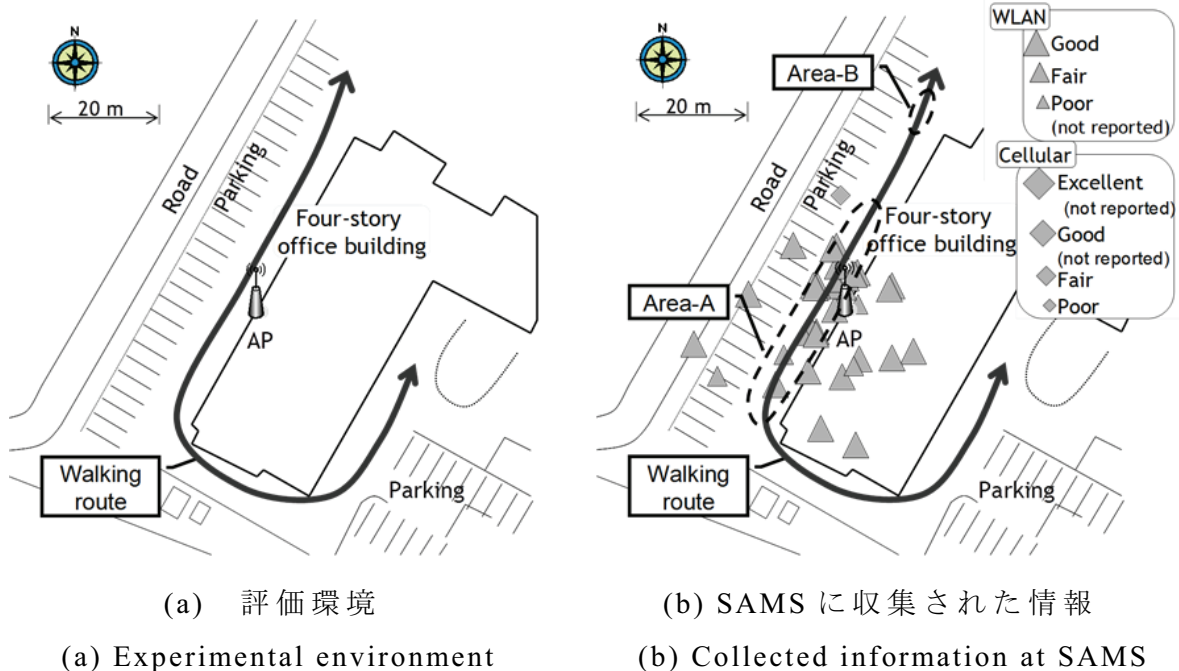


図 3 - 10 評価環境と結果

Figure 3-10: Experimental environment and result

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

たからであった。

3.2.2.4 消費電力評価

本節では、簡単に、提案手法を用いた場合の MN のネットワーク探索に係る消費電力について分析を行う。また、比較の為、通信中のみ定期的に無線 LAN インタフェースを立ち上げ、スキャンするシナリオについても分析する。

まず、カバレッジ情報の動的作成に係る消費電力 PW_{PROP_RPT} は、

$$PW_{PROP_RPT} = PW_{REG_RPT} * R_{LCS} \quad (3-1)$$

と表すことができる。ここで、 PW_{REG_RPT} は定期的にサービスエリア情報を SAMS へ送信する場合の単位時間当たりの消費電力であり、後述する式(3-2)で表せる。また、 R_{LCS} は、無線 LAN 等の狭域無線ネットワークの品質が良好な場所の空間的な存在確率である。これは、3.2.2.1 で「無線 LAN 等の狭域無線ネットワークの情報は通信品質の良好な場所のみ収集する」とした収集条件②に関するものである。セルラ情報を収集する場合は、 R_{LCS} の代わりに R_{BCS} を用いる。

$$PW_{REG_RPT} = (PW_{GPS} * T_{GPS_W} + PW_{ACT} * T_{UL}) * 1/C_{RPT} \quad (3-2)$$

ここで、各パラメータの定義と、本節で想定するパラメータ値を表 3 - 3 に示す。 $PW_{GPS} * T_{GPS_W}$ はサービスエリア情報収集 1 回当たりの GPS 測位に要する消費電力であり、 $PW_{ACT} * T_{UL}$ は、収集したサービスエリア情報のアップロード 1 回当たりの消費電力である。 C_{RPT} は、収集間隔を示す。

次に、通信中のネットワーク探索に要する消費電力を計算する。通信中のみ定期的に無線 LAN インタフェースを立ち上げ、スキャンするシナリオにおける単位時間当たりの消費電力 PW_{BSC_DIS} は、以下のように表すことができる。

$$PW_{BSC_DIS} = N_{CH} * T_{wait} * PW_{WLAN} * 1/C_{WLAN} \quad (3-3)$$

ここで、 $N_{CH} * T_{wait} * PW_{WLAN}$ は、全チャネルをスキャンするのに必要となる消費電力であり、 C_{WLAN} はスキャン間隔を示す。スキャンに要する時間は、例えば 0.105 [s] である [36]。

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

表 3 - 3 パラメータ定義とパラメータ値
Table 3-3: Definition and value of parameters in use

Parameter	Definition	Value
PW_{GPS} [mW]	Consumed Power in GPS acquisition mode	69 [25]
T_{GPS_W} [sec]	Duration for which a GPS receiver keeps scanning GPS signals from satellites in the warm start mode	34 [25]
T_{GPS_H} [sec]	Duration for which a GPS receiver keeps scanning GPS signals from satellites in the hot start mode	5 [25]
PW_{ACT} [mW]	Consumed power for the network I/F during Tx/Rx	1063.75 (Cellular) [24] 1086.43 (Wireless LAN) [24]
T_{UL} [sec]	Duration for transmitting the information to the SAMS	0.002 ^{*1}
T_{DL} [sec]	Duration for receiving the available access system list from the SAMS	0.0024 ^{*2}
C_{RPT} [sec]	Periodic reporting cycle	1800
R_{LCS} [%]	Ratio of the area, where a limited coverage system is provided and the radio quality is good, to the whole area	10 ^{*3}
R_{BCS} [%]	Ratio of the area, where a broad coverage system is provided and the radio quality is bad, to the whole area	10
N_{CH}	number of WLAN channels to be scanned	28 ^{*4}
T_{wait} [sec]	passive scan wait time	0.105 [36]
PW_{WLAN} [mW]	Power consumption during the WLAN AP discovery phase	1015.06 [24]
C_{WLAN} [sec]	WLAN passive scanning cycle	30 [36]
C_{INQ} [sec]	The cycle of the inquiry to the SAMS	30

*1: On sending a 122 Byte packet, which was used as one report message in the prototype system, over 500 Kbit/s wireless link

*2: On sending a 153 [Byte] packet, which is used as one list message in the prototype system, over 500 Kbit/s wireless link

*3: The value is calculated from the following assumption: the initial plan of the WiMAX service in Japan was to cover about 20.5 % of the population by the end of 2009, and the area in which the radio quality is good is assumed to be 49 % (area inside 70 % of radius from the center of a cell is good) of the total coverage.

*4: In the case of IEEE802.11a/b/g combo NIC [36]

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

一方，提案手法におけるネットワーク探索に要する単位時間当たりの消費電力 PW_{PROP_DIS} は，

$$PW_{PROP_DIS} = (PW_{GPS} * T_{GPS_H} + PW_{ACT} * (T_{DL} + T_{UL})) * 1/C_{INQ} \quad (3-4)$$

と表すことができる．提案手法では，3.2.2.2に記載のように，MNは位置情報と現在利用している通信システムを付加したクエリをSAMSへ通知し，SAMSから利用可能アクセスシステムリストを受信するが， $PW_{GPS} * T_{GPS_H}$ が測位に要する消費電力を， $PW_{ACT} * (T_{DL} + T_{UL})$ がクエリ送信と利用可能アクセスシステムリスト受信に要する消費電力を示している．また， C_{INQ} はクエリ送出間隔であり，本評価では C_{WLAN} と同じ値を用いるものとする．

上記を元に，MNのネットワーク探索に係る1日の消費電力を計算する．

内閣府の調査結果[37]によれば，日本の高校生が携帯電話を用いてインターネットへアクセスする時間は108.22分/日（男子学生：91.7分，女子学生：124.4分）である．そこで，本評価では，ユーザは1日108.22分だけMNで通信を行うことを想定する．なお，通常ユーザは間欠的にMNを利用することが多いが，簡単のため，ここでは連続して108.22分MNを用いるものとする．

通信中のみ定期的に無線LANインタフェースを立ち上げてスキャンするシナリオにおける消費電力 PW_{BSC_Total} は，

$$\begin{aligned} PW_{BSC_Total} &= PW_{BSC_DIS} * (108.22 * 60) / 3600 \\ &= 179.42[mWh] \end{aligned} \quad (3-5)$$

となる．一方，提案手法を用いた場合の消費電力 PW_{PROP_Total} は，

$$\begin{aligned} PW_{PROP_Total} &= PW_{PROP_RPT} * ((1440 - 108.22) * 60) / 3600 + PW_{PROP_DIS} * (108.22 * 60) / 3600 \\ &= 23.92[mWh] \end{aligned} \quad (3-6)$$

となり， PW_{BSC_Total} に比べて85%以上の消費電力削減につながる事が分かる．

3.2.3 無線WANの受信信号強度の変動を活用した異種無線ネットワーク探索

3.2.2で提案した手法は，MNとエリアマップサーバSAMSが協調して効率的なバーチカルハンドオーバを実施するものである．多くのMNから報告されるカバレッジ情

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

報の集合知を用いることで、情報が集まるほど無駄なハンドオーバを減らせるようになると期待されるが、サーバを構築しなければならないというデメリットがある。

本節では、セルラから無線 LAN へのハンドオーバを前提に、MN 内部で完結するネットワーク探索手法を提案する。本提案手法は、無線 LAN の多くが屋内をサービスエリアとしていることに着目し、セルラの電波強度の変動パターンを観測することで MN の屋内への侵入を推測し、無線 LAN の通信インタフェースを起動するものである [38]。具体的には、セルラ電波の Received Signal Strength (RSS) 値の変動を観測し、一

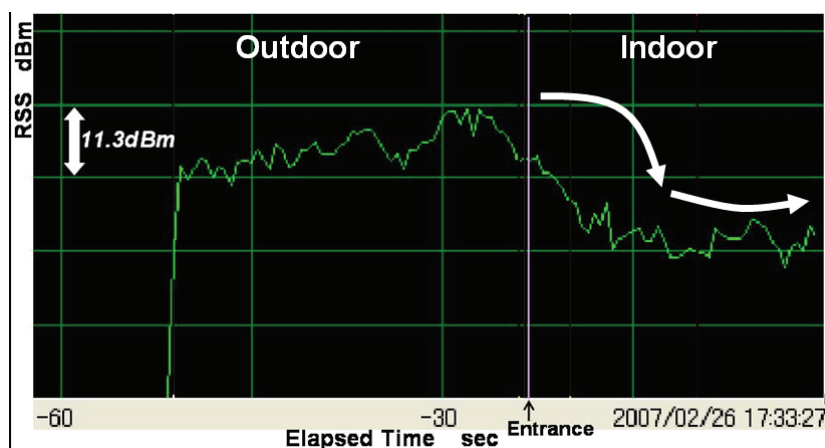


図 3 - 11 オフィスビルへ進入した際のセルラ電波強度の変動

Figure 3-11: Fluctuation in RSS of cellular system when movement into an office building



図 3 - 12 集合住宅へ進入した際のセルラ電波強度の変動

Figure 3-12: Fluctuation in RSS of cellular system when movement into an apartment

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチャルハンドオーバ

定時間 T_1 内に一定量 RSS が落ち込み，その後時間 T_2 の間 RSS が落ち込み続けると，屋内への進入と判断して無線 LAN 探索を開始する．一時的な落ち込みだけでなく，その後の変動を観測するのは，フェージング等による一時的な電波強度の落ち込みによる誤推定を防止するためである．屋外から，オフィスビル及び集合住宅の中へ進入した際の RSS の変動の様子を，それぞれ図 3 - 11，図 3 - 12 に示す．また，図 3 - 13 に示す屋外を 19 分程度歩行したところ， T_1 内に一定量 RSS が落ち込んだ回数は 33 回であったが，その後， T_2 の間 RSS が落ち込み続けるのは 2 回だけであった．このことから，本手法は，フェージング等による一時的な電波強度にロバストであることが分かる．本提案手法は，接続している無線システムの無線強度の変動を観測するというだけであるため，ネットワークへの追加設備も MN への新たなデバイスも必要としないため展開しやすく，また新たなデバイスに係る電力も不要であるが，推測の精度やモバイル WiMAX 等屋外も主なエリアとする無線ネットワークの探索が困難であるなどの問題が残っている．

3.3 異種無線ネットワーク選択

異種無線ネットワーク探索フェーズにて，現在接続中のネットワーク以外に新たに 1 つ以上の無線ネットワークを発見した場合は，どのネットワークに接続すべきかを決定する必要がある．最も基本的なものは RSS を用いたものであり，[39]では，例えばセルラで通信中に，無線 LAN の RSS 値が一定時間だけ所定値以上観測されたら無



図 3 - 13 歩行経路

Figure 3-13: Walking path with 3D buildings (from “Google earth”)

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

線 LAN への切り替えを実行するとしている。

しかしながら、異なる無線ネットワーク間の品質を RSS のみで比較するのは難しいため、Quality of Service (QoS) を考慮にいたれた数多くの提案がなされている [40][41][42][43][44]。[40]では実行中のアプリケーションに応じて最適な QoS (スループットや遅延時間、パケットロス率)を得られる無線ネットワークへの切り替えを実施する。筆者らは、IEEE802.21 の枠組みを利用して受付制御をすることで、QoS を保てる場合のみハンドオーバを許可する提案を行った [41]。また、目的として QoS を、評価基準としてスループットや遅延時間などの様々なメトリックを当てはめて階層分析法 (Analytic Hierarchy Process: AHP) で最適な無線ネットワークを導出する手法 [42] も提案されている。さらに、ロードバランスを考慮した提案 [43] や、QoS を保ちながらネットワーク収入を最大化するためにセミマルコフ決定過程 (SMDP) でモデル化し、Q-learning アルゴリズムを用いてポリシーを決定する方法も提案されている [44]。

ネットワーク選択フェーズでは実に数多くの研究がなされており上記はほんの一部であるが、QoS やコスト、ネットワーク利用効率、バッテリーフレンドリ等の中から何を最も優先したいかはユーザやオペレータ依存であり、一意に決められるものではない。重要なのは、得やすい情報 (ネットワークの種類等静的なものが多い; 逆にグッドプットや遅延ジッタ等動的な情報は得にくい) を用いて、どこまで簡易に、適したネットワークを選択できるかということであると考えられる。

3.4 異種無線ネットワーク切り替え

本節では、異種無線ネットワーク探索フェーズ、異種無線ネットワーク選択フェーズを経て、実際に無線ネットワークを切り替える際に用いる技術について述べる。

3.4.1 従来手法

異種無線ネットワークにおける移動管理をネットワークレイヤで実現する技術のベースとなるのは、図 3 - 14 に示す IETF で標準化された Mobile IP [45] であり、MN が IP アドレス変更等の情報をネットワーク内の移動管理サーバに通知する機能を有する。基本的には MN 宛のデータは同サーバ宛にルーティングされ、同サーバが当該データを IP カプセル化して MN へ転送することで、MN が移動してもデータ到達性を提供するものである。一方、Proxy MIP [46][47] (図 3 - 15) は、MN ではなくネットワー

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチャルハンドオーバ

クの別のエンティティ (Mobile Access Gateway: MAG)と移動管理サーバ (Local Mobility Anchor: LMA)間で IP トンネルを張ることで, MN 自身が移動管理機能を有していなくても異種ネットワーク間でのセッション継続を可能にするネットワークベースのプロトコルである. MN が移動しても同じ IP アドレスを LMA が同 MN へ割り当てるため, MN の移動は上位レイヤに隠蔽されることになる.

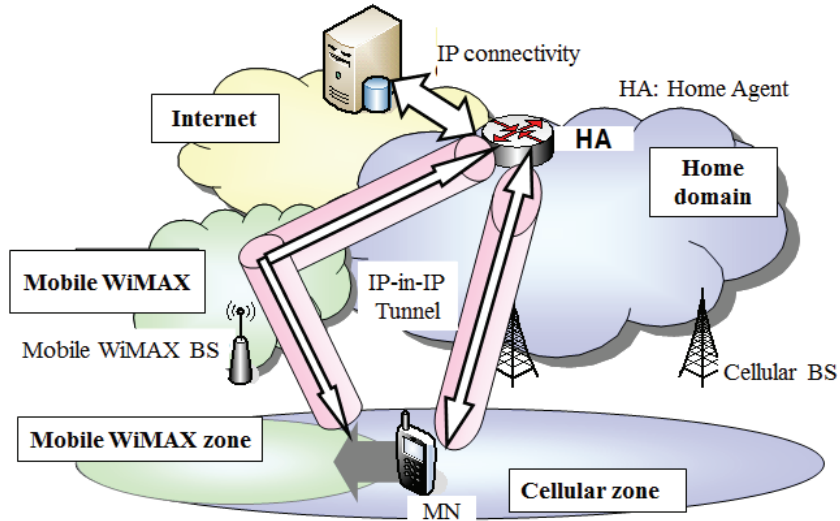


図 3 - 14 モバイル IP (Co-located 気付アドレスの場合)

Figure 3-14: Mobile IP (in the case of co-located care-of-address)

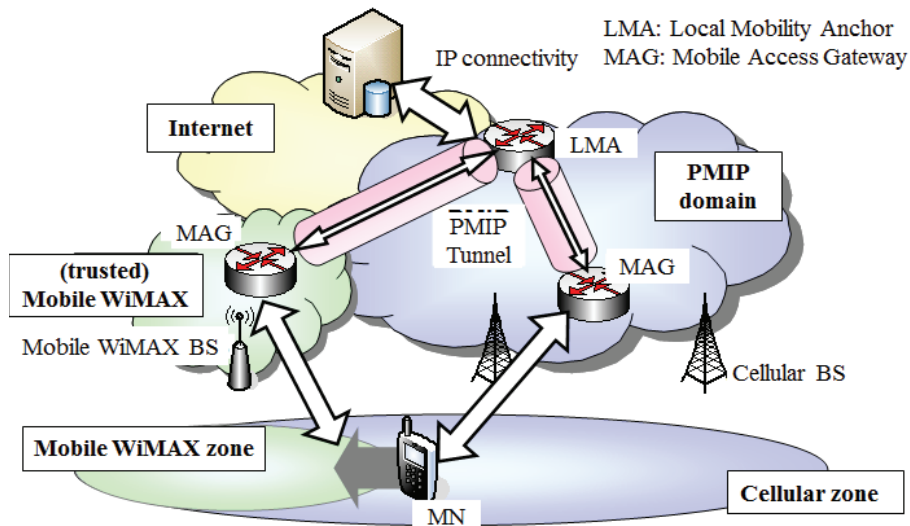


図 3 - 15 プロキシモバイル IP

Figure 3-15: Proxy Mobile IP

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー

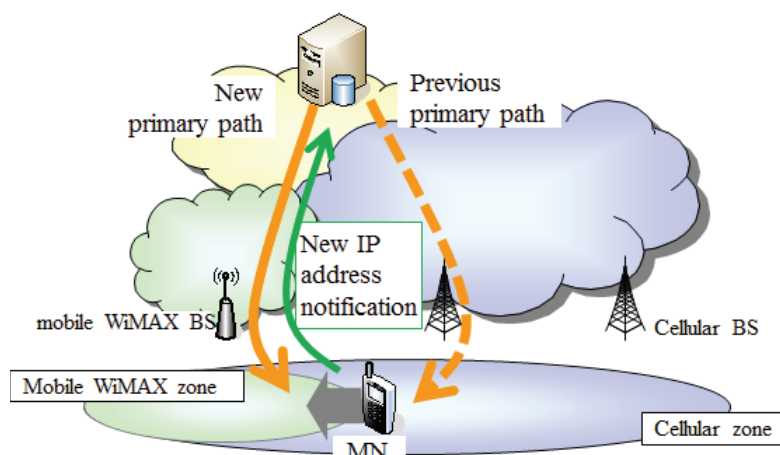


図 3 - 16 モバイル Sctp

Figure 3-16: mobile Sctp

同じく IETF においては、トランスポートレイヤでの議論もされており、例えば複数のアドレスをアソシエーションに関連付けることで移動管理を実現する Mobile Stream Control Transmission Protocol (mSCTP) [48]等が提案されている (図 3 - 16). これは、マルチストリーム機能を有する Sctp のマルチホーミング機能を利用した移動管理手法である.

さらに、アプリケーションレイヤでの提案として、マルチメディアセッションの制御に利用される Session Initiation Protocol (SIP) [49]を利用してバーチカルハンドオーバーを実現する検討も行われており [50], 筆者も IETF にて提案を行った [51][52].

また、多くの研究論文で、ハンドオーバー中のパケットロスを減らしたり、ハンドオーバーに起因するサービス断を短くしたりする検討が行われている. 例えば、ハンドオーバー実行中は MN 宛のパケットをハンドオーバー前のアクセスルータに蓄積し、ハンドオーバー完了後に MN へ配送することでパケットロスを無くす技術 [53]などである. また、筆者も、明示的なハンドオーバー通知を通信相手に送ることで、ハンドオーバー中のパケットロスによる TCP スループット低下を抑制する手法を検討した [54].

ここで、異種無線ネットワーク環境では、「無線ネットワーク毎に伝送速度や通信遅延時間が大きく異なる」ことが、同一無線ネットワークとの大きな違いとなる.

高速ネットワークから中低速ネットワークへのバーチカルハンドオーバー、例えば無線 LAN からセルラへのバーチカルハンドオーバーにおいては、高速ネットワークでの高レートなフローが中低速ネットワークへ流れ込み、中低速ネットワークに元々接続

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

していたユーザの通信品質を大きく劣化させることになる恐れがある。そのため筆者は、TCP等の非リアルタイムフローに対して、バーチカルハンドオーバを実施するMNのデータを敢えて廃棄し適度なレートに制御する手法を考案した[55]。図3-17はその概要を説明したものであり、バーチカルハンドオーバを実施するMNはネットワーク内の滞留パケット量と最大RTT値をバーチカルハンドオーバ先のBSへ通知し、BSが滞留パケット量と自身内のバッファ残量とから当該MN宛のパケット廃棄率を設定し、バーチカルハンドオーバ後に送られてくるパケットを廃棄するものである。また、リアルタイムフローを対象にTCP-Friendly Rate Control (TFRC)を利用し、BSがMNに代わってフィードバック情報を送信者に送出することで素早くレートを制御する手法の検討も行った[56]。

上記の手法(例えば[53])は、ハンドオーバ時のパケットロス数を減らしたり、ハンドオーバによる通信断を短くしたりすることができるため、ユーザがWebブラウジングやファイル転送サービスを利用中であれば、ハンドオーバの影響はほとんどなくなると言える。しかし、ユーザがビデオ視聴やVoice over IP (VoIP)、ビデオ電話等のリアルタイム通信を実施していると、アクセスルータに蓄積され、所定時間以上遅れて到着するパケットには意味が無くなるため、ユーザエクスペリエンスは低下する。

一方、使用するネットワークリソース量は増えるものの、リアルタイム通信中のハンドオーバに有効なのがバイキャスト(ソフトハンドオーバ)手法である[57][58][59][60]。MNはハンドオーバ中、複製された同一のIPパケットを、ハンドオーバ前後の

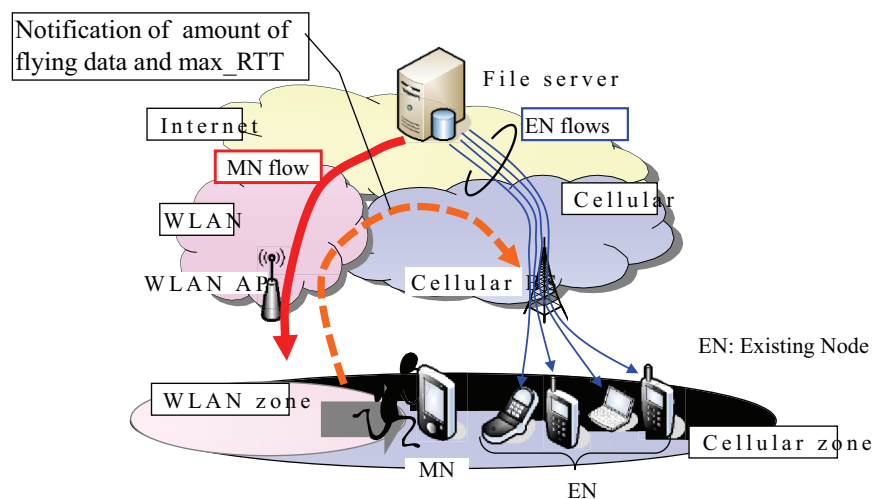


図3-17 既接続端末を考慮したバーチカルハンドオーバ制御
Figure 3-17: Vertical handover management considering existing nodes

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー

ネットワークからそれぞれ受信する。パケットの複製は、通信相手端末やゲートウェイ、アクセスマルータ等で実施される。MNは、ハンドオーバーの際、一方のネットワークからのパケットがロスしても、他方のネットワークからのパケットを受信できればMN上でのパケット損失は発生せず、またどこかで蓄積したパケットではないため、リアルタイム性も確保できる。ハンドオーバーが完了すると、パケットの複製が終了し、通常の通信に戻る。

このように、バイキャスト手法は、リアルタイム通信中であっても、パケット損失数低減やハンドオーバー遅延時間短縮に働く。しかしながら、有効に働くのはIPパケット損失数低減やハンドオーバー遅延時間短縮といったネットワークレベルでの指標である。ここで、3.1に記載し、本節の対象としている非緊急ハンドオーバーの定義を再掲する。

“② 非緊急ハンドオーバー (*Non-urgent handover*): 利用中の無線ネットワークのカバレッジ内であっても、アプリケーションやユーザの意向により、よりよい無線ネットワークへの切り替えを要求される場合

本節では異種無線ネットワークを対象としており、非緊急ハンドオーバーは、例えばユーザがセルラ（例えば3G）でビデオ視聴している際、より高速であるという理由で無線LANへの切り替えを望む場合に実施される。これは、無線LANに切り替えたらビデオが高品質になることを期待してのことである。

一方、上述のバイキャスト手法で得られるのはネットワークレベルでのシームレス切り替えであるため、例えばユーザが3Gで200 Kbit/s, 5 frame/sのビデオを視聴している中で、無線LANへ切り替えても、200 Kbit/s, 5 frame/sのビデオが継続されるだけである。逆に、ユーザが無線LANで600 Kbit/s, 15 frame/sのビデオを開始しても、ユーザの移動で3Gへ無線ネットワークを切り替えると、パケットロスが頻発して満足なサービス享受が出来なくなる可能性がある。

このように、ユーザの視点に立った場合、バーチカルハンドオーバー時に必要な要件は、

(R1) 双方向リアルタイムサービス利用時であっても、アプリケーションレベルで途切れを生じない

だけでなく、

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

(R2) 無線ネットワーク切り替えを行うたびに、切り替え先のネットワークに適したサービス品質へ適応する

を満たすことも必要であることが分かる。

そこで、以下では、要件(R1), (R2)の両方を満たす手法を提案する。提案手法は、二つの手法から構成される。異品質ストリームのバイキャスト手法と、遅延時間差吸収手法である。3.4.2にて異品質ストリームのバイキャスト手法を、3.4.3にて遅延時間差吸収手法を説明する。

3.4.2 SIP ベースの異品質ストリームのバイキャスト手法

本節では、SIP ベースの異品質ストリームのバイキャスト手法について説明する。異品質ストリームのバイキャストは、一つのメディアストリームから、ハンドオーバ前後の無線ネットワークに応じた二つのメディアストリームを作成して送信することである。想定するネットワーク構成を図3-18に示す。ネットワークは高速無線アクセスネットワーク (High speed wireless access network: HSWA)、セルラネットワーク、コアネットワークから構成される。また、高速無線アクセスネットワークのカバレッジはセルラネットワークのカバレッジに重畳されているものとする。ネットワーク内には、ハンドオーバ支援サーバ (Handover assisted server: HOAS)が導入されている。

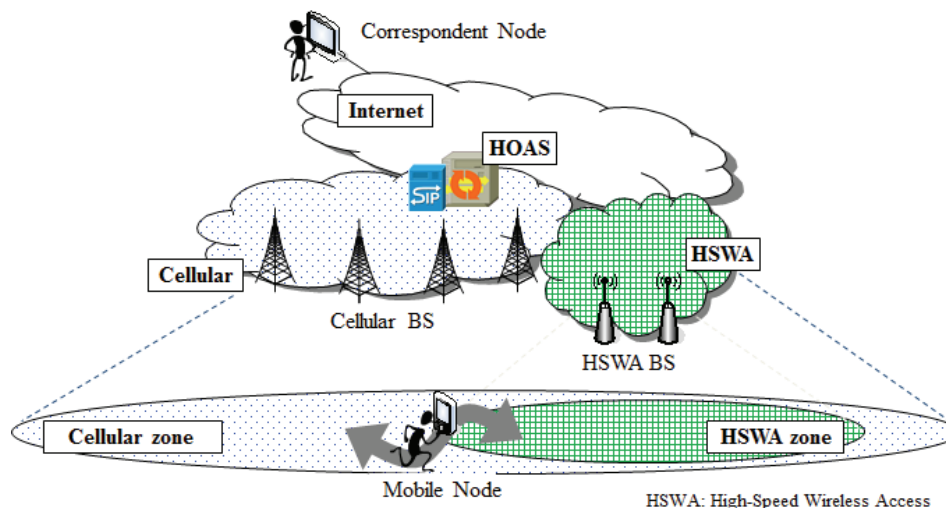


図3-18 想定する異種無線ネットワーク構成

Figure 3-18: Assumed heterogeneous access networks

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

る。HOASは、本提案で新たに導入したネットワークエンティティである。なお、図3-18からは、提案手法に直接関係の無いエンティティ（例えば SIP Registrar）は除外してある。MNはマルチモード端末であり、高速無線アクセスとセルラの通信インタフェースを具備するものとする。

ここで、MNはまず高速無線アクセスネットワークを介して通信相手端末 (Correspondent node: CN)と双方向のマルチメディアセッションを開始し、MNの移動により高速無線アクセスエリアを出てセルラシステムへ切り替える、というシナリオを想定する。以降では、異品質ストリームのバイキャスト手法について、以下の2通りの実現方向を検討する。

(i) Back-to-Back User Agent (B2BUA)を用いたバイキャスト

(ii) Third Party Call Control (3pcc)を用いたバイキャスト

なお、本節で用いる各 IP アドレスは以下の通り表すものとする。

MN のセルラインタフェース	: IP_ce
MN の高速無線アクセスインタフェース	: IP_hs
HOAS	: IP_ho
CN	: IP_cn

3.4.2.1 Back-to-back user agent (B2BUA)を用いたバイキャスト

本手法では、ハンドオーバ支援サーバ HOAS が SIP アプリケーションサーバ (SIP-AS)となり、B2BUAとして機能する。B2BUAは論理的な SIP エンティティであり、MNとCN間に介在する User agent (UA)である。よって、ダイアログは、MN-B2BUA間、B2BUA-CN間でセットアップされる。

図3-19は、B2BUAを用いた場合の提案手法の通信シーケンスである。以下で、図3-19を用いて本通信シーケンスの説明を行うが、図3-19の右側のA、B、Cで区切られた計三つのステップを一つずつ見ていくこととする。なお、図3-19からは、100 Trying メッセージ等、提案手法に直接関係の無いメッセージは除外してある。

STEP A: セッション確立

図 3 - 19 のステップ A は，メッセージ 1~4 からなるセッション確立に関するものである．メッセージ 1~4 の SIP ヘッダやメディアケーパビリティなどを記述した Session Description Protocol (SDP) [61]ペイロード部などを図 3 - 20 に示す．

HOAS は B2BUA として振る舞うため，MN が CN とのセッションを開始するために送信した SIP INVITE メッセージ(1)を受信すると，`sip:MN@IP_hs` となっている Contact ヘッダのアドレスを，`sip:MN@IP_ho` というように自身のアドレス (IP_ho) で書き換えた SIP INVITE メッセージ(2)として，CN へ送る．この SIP INVITE メッセージ(1)は，例えば IP Multimedia Subsystem (IMS) [62]の Call Session Control Function (CSCF)によって HOAS へルーティングされる．ここで，HOAS は B2BUA サーバなので，MN-HOAS 間のダイアログは HOAS-CN 間のダイアログと異なることに注意が必要である．これら SIP INVITE に対する 200 OK と ACK の送受により，マルチメディアストリームが MN-CN のエンド-エンドで確立される．ここで，図 3 - 20 のメッセージ 1 及び 2 の SDP 中のコネクションデータ (Connection Data: “c=”フィールド)及び同 3 及び 4 のコネクションデータの接続アドレスが，それぞれ IP_hs と IP_cn になっているため，マルチメディアストリームはエンド-エンドで張られる．このことは，HOAS が送信するメッセージ 2 及び 4 において，コネクションデータの接続アドレスを自身のアドレス(IP_ho)に変えることで，マルチメディアストリームを常に HOAS 経由とすることも可能であることを意味する．この処理は，例えばノード間で利用可能なコーデックがマッチしない場合に，ストリームを HOAS 経由にしてトランスコードサポートを受ける場合などに有用となる．また，ネットワーク管理の側面から，マルチメディアストリームを常に HOAS 経由とする場合もあると考えられる．例えば，プライバシー保護等を目的とする場合であり，これは，Contact ヘッダのアドレス，SDP のコネクションデータの接続アドレスを HOAS の IP アドレスにすることで，エンド端末へお互いの IP アドレスを隠すことが可能となる．

STEP B: バーチカルハンドオーバ

バーチカルハンドオーバを実施する際，それまで MN-CN のエンド-エンドで確立されていたマルチメディアストリームは，HOAS 経由となる．この際，HOAS は CN からのパケットを複製し，それぞれのパケットに対してメディアトランスコードを実施する．このトランスコードは，それぞれ高速無線アクセスネットワークに適したレート及びセルラネットワークに適したレートで実施される．その結果，HOAS は，MN の現在の接続先である高速無線アクセスネットワークに適した品質のストリームと，

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー

MNのハンドオーバー先であるセルラネットワークに適した品質のストリームの2種類のストリームを生成することになる。HOASはそれら二つの異なる品質のストリームをそれぞれのネットワークを介してMNまでバイキャスト送信する。

以下に、詳細なバーチカルハンドオーバープロセスについて説明する。図3-19のステップBは、メッセージ5~8からなるバーチカルハンドオーバー処理に関するものである。メッセージ5~8のSIPヘッダやSDPペイロード部などを図3-20に示す。

3.2に記載のネットワーク探索と、3.3に記載のネットワーク選択を経て、MNが高速無線アクセスネットワークからセルラアクセスネットワークへの切り替えを決めると、MNはSIP UPDATEメッセージ(5)をHOASへ送信する。このメッセージには、図3-20のMessage 5に示すように、“Translator”ヘッダが新たに追加される。このヘッダは提案手法実現のために筆者らが追加したものである。この“Translator”ヘッダによって、HOASはバイキャスト要求がMNからあることを理解する。また、SIP UPDATEメッセージ(5)を用いて、MNは両ネットワークインタフェースのIPアドレス、ポート番号及びメディアケーパビリティをHOASへ通知する。図3-20のMessage 5におけるSDPには、高速無線アクセス向けのIPアドレス、ポート番号としてそれぞれIP_hsと10000を、セルラネットワーク向けのIPアドレス、ポート番号としてそれぞれIP_ceと10002を用いることが記載されている。また、高速無線アクセス向けのメディア品質として、“a=framerate:15”、“b=AS:600”とある。前者は属性 (Attribute: “a=”フィールド)、後者は帯域 (Bandwidth: “b=”フィールド)であり、それぞれ、フレームレートが15 frame/s、帯域が600 Kbit/sであることを示している(帯域フィールドの“AS”は帯域タイプ (bandwidth type)がApplication Specificであることを示し、本例のようなRTPベースのアプリケーションの場合、セッション帯域幅 (Session bandwidth) [63]を示す)。つまり、本例では、MNは高速無線アクセス向けのメディア品質として15 frame/s、600 Kbit/sを、セルラ向けのメディア品質として5 frame/s、200 Kbit/sを要求している。このメディア品質は、状況に応じて半リアルタイムに動的設定されることが望ましいが、IEEE802.21のMedia Independent Information Service (MIIS) [30]を用いたり、ネットワーク種別ごとに予め定めることもできる。

HOASが“Translator”ヘッダのついたSIP UPDATEメッセージ(5)を受信すると、HOAS-CN間のダイアログにて、SIP UPDATEメッセージ(6)をCNへ送信する。SIP UPDATEメッセージ(6)のSDPペイロードには、コネクションデータ (“c=”フィールド)の接続アドレスとしてHOASのIPアドレス (IP_ho)がセットされる。このメッセージにより、CNからMNへのエンド間ストリームがHOAS経由になる。MNからCNへのエンド間ストリームは、MNが200OKメッセージ(8)を受信することで、HOAS経由へ

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

と切り替わる。200OK メッセージ(8)は、SIP UPDATE メッセージ(5)に対するレスポンスであり、SDP ペイロードのコネクションデータ(“c=”フィールド)の接続アドレスとして、HOAS の IP アドレス (IP_ho)がセットされている。この時点で HOAS は、CN から受けたストリームの複製、トランスコード、バイキャストを開始する (図 3 - 20 の a)。上述の通り、MN からの SIP UPDATE メッセージ(5)の SDP ペイロードにて要求された品質に合わせてストリームのトランスコードが実施される。このプロセスが、3.4.1 にて掲げた以下の二つの要求：

“(R1) 双方向リアルタイムサービス利用時であっても、アプリケーションレベルで途切れを生じない

“(R2) 無線ネットワーク切り替えを行うたびに、切り替え先のネットワークに適したサービス品質へ適応する

を満たすのに役立つこととなる。

MN から CN への通信方向についても、HOAS まで異品質の二つのストリームをそれぞれのネットワークを介して同時に送信し、HOAS にて必要に応じてトランスコードを実施後、1つのストリームとして CN へ送信する。

STEP C: バーチカルハンドオーバ完了

バーチカルハンドオーバは、3.4.3 で説明する遅延時間吸収 (Delay Difference Absorption; DDA)手法を経て、完了する (図 3 - 20 の b)。図 3 - 19 のステップ C はバーチカルハンドオーバ完了直後に実施するシーケンスを示しており、メッセージ 9～12 の SIP ヘッダや SDP ペイロード部などは図 3 - 20 に示す通りである。

バーチカルハンドオーバが完了すると、MN はハンドオーバ後に利用している通信インタフェース (本例ではセルラインタフェース)から、“Translator”フィールドを含まない通常の SIP UPDATE メッセージ(9)を HOAS へ送信する。このメッセージを受信した HOAS は、コネクションデータ(“c=”フィールド)の接続アドレスとして、MN のセルラインタフェースに割り当てられた IP アドレス (IP_ce)をセットした SDP を含む SIP UPDATE メッセージ(10)を CN へ送信する。これにより、CN から MN へのストリームは HOAS を経由せずエンドーエンドとなる。同様に、200OK メッセージ(12)により、MN から CN へのストリームもエンドーエンドに切り替わる。

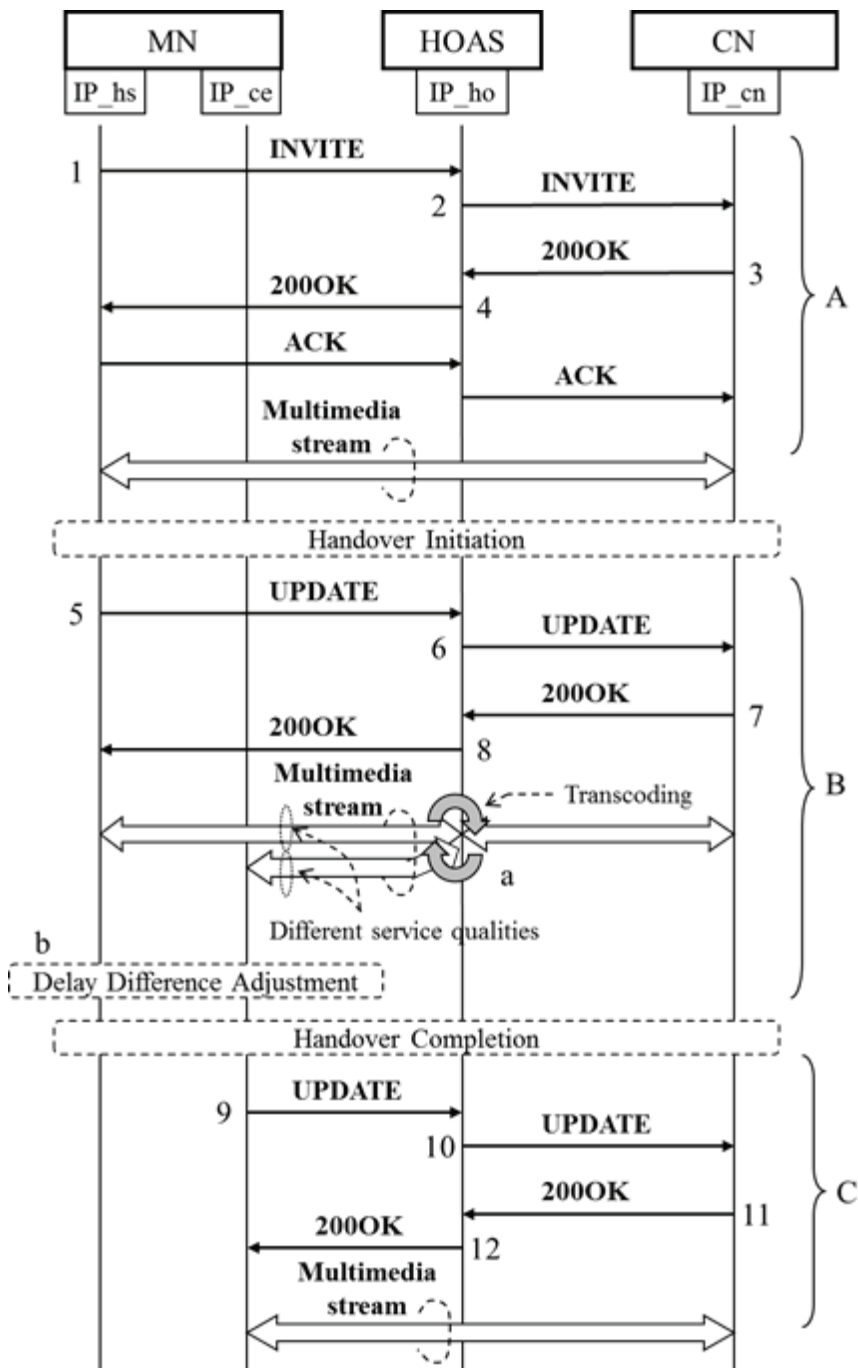


図 3 - 19 B2BUA を用いた異品質ストリームバイキャストのハンドオーバーシーケンス

Figure 3-19: Handover sequence of the proposed difference quality stream bicasting using B2BUA

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチャルハンドオーバー

Message 1: MN(hs) → HOAS
 INVITE sip:CN@example.com SIP/2.0
 To: sip:CN@exmaple.com
 From: sip:MN@example.com; tag=af2c35
 Call-ID: bi32c@example.com
 Contact: sip:MN@IP_hs
 m=video 10000 RTP/AVP 96 97
 c=IN IP4 IP_hs
 a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
 a=framerate:5
 b=AS:200
 a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
 a=framerate:15
 b=AS:600

Message 2: HOAS → CN
 INVITE sip:CN@example.com SIP/2.0
 To: sip:CN@exmaple.com
 From: sip:MN@example.com; tag=dfad12
 Call-ID: 3ec5c@example.com
 Contact: sip:MN@IP_ho
 m=video 10000 RTP/AVP 96 97
 c=IN IP4 IP_hs
 a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
 a=framerate:5
 b=AS:200
 a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
 a=framerate:15
 b=AS:600

Message 3: CN → HOAS
 SIP/2.0 200 OK
 To: sip:CN@exmaple.com; tag=fa52b
 From: sip:MN@example.com; tag=dfad12
 Call-ID: 3ec5c@example.com
 Contact: sip:CN@IP_cn
 m=video 20000 RTP/AVP 97
 c=IN IP4 IP_cn
 a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
 a=framerate:15
 b=AS:600

Message 4: HOAS → MN(hs)
 SIP/2.0 200 OK
 To: sip:CN@exmaple.com; tag=ccfd12
 From: sip:MN@example.com; tag=af2c35
 Call-ID: bi32c@example.com
 Contact: sip:CN@IP_ho
 m=video 20000 RTP/AVP 97
 c=IN IP4 IP_cn
 a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
 a=framerate:15
 b=AS:600

Message 5: MN(hs) → HOAS
 UPDATE sip:CN@example.com SIP/2.0
 To: sip:CN@exmaple.com; tag=ccfd12
 From: sip:MN@example.com; tag=af2c35
 Call-ID: bi32c@example.com
 Contact: sip:MN@IP_hs
 Translator: sip:example.com;bicast
 m=video 10000 RTP/AVP 97
 c=IN IP4 IP_hs
 a=rtpmap:97 MP4V_ES/9000
 a=framerate:15
 b=AS:600

Message 6: HOAS → CN
 UPDATE sip:CN@example.com SIP/2.0
 To: sip:CN@exmaple.com; tag=fa52b
 From: sip:MN@example.com; tag=dfad12
 Call-ID: 3ec5c@example.com
 Contact: sip:MN@IP_ho
 m=video 30000 RTP/AVP 97
 c=IN IP4 IP_ho
 a=rtpmap:97 MP4V_ES/9000
 a=framerate:15
 b=AS:600

Message 7: CN → HOAS
 SIP/2.0 200 OK
 To: sip:CN@exmaple.com; tag=fa52b
 From: sip:MN@example.com; tag=dfad12
 Call-ID: 3ec5c@example.com
 Contact: sip:CN@IP_cn
 m=video 20000 RTP/AVP 97
 c=IN IP4 IP_cn
 a=rtpmap:97 MP4V_ES/9000
 a=framerate:15
 b=AS:600

Message 8: HOAS → MN(hs)
 SIP/2.0 200 OK
 To: sip:CN@exmaple.com; tag=ccfd12
 From: sip:MN@example.com; tag=af2c35
 Call-ID: bi32c@example.com
 Contact: sip:CN@IP_ho
 Translator: sip:example.com;bicast
 c=IN IP4 IP_ho
 m=video 30002 RTP/AVP 97
 a=rtpmap:97 MP4V_ES/9000
 a=framerate:15
 b=AS:600
 m=video 30004 RTP/AVP 96
 a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
 a=framerate:5
 b=AS:200

Message 9: MN(ce) → HOAS
 UPDATE sip:CN@example.com SIP/2.0
 To: sip:CN@exmaple.com; tag=ccfd12
 From: sip:MN@example.com; tag=af2c35
 Call-ID: bi32c@example.com
 Contact: sip:MN@IP_ce
 m=video 10002 RTP/AVP 96
 c=IN IP4 IP_ce
 a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
 a=framerate:5
 b=AS:200

Message 10: HOAS → CN
 UPDATE sip:CN@example.com SIP/2.0
 To: sip:CN@exmaple.com; tag=fa52b
 From: sip:MN@example.com; tag=af2c35
 Call-ID: 3ec5c@example.com
 Contact: sip:MN@IP_ho
 m=video 10002 RTP/AVP 96
 c=IN IP4 IP_ce
 a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
 a=framerate:5
 b=AS:200

Message 11: CN → HOAS
 SIP/2.0 200 OK
 To: sip:CN@exmaple.com; tag=fa52b
 From: sip:MN@example.com; tag=af2c35
 Call-ID: 3ec5c@example.com
 Contact: sip:CN@IP_cn
 m=video 20000 RTP/AVP 96
 c=IN IP4 IP_cn
 a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
 a=framerate:5
 b=AS:200

Message 12: HOAS → MN(ce)
 SIP/2.0 200 OK
 To: sip:CN@exmaple.com; tag=ccfd12
 From: sip:MN@example.com; tag=af2c35
 Call-ID: bi32c@example.com
 Contact: sip:CN@IP_ho
 m=video 20000 RTP/AVP 96
 c=IN IP4 IP_cn
 a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
 a=framerate:5
 b=AS:200

図 3 - 20 B2BUA を用いたバイキャスト手法におけるメッセージ詳細

Figure 3-20: Message detail in the bicast using B2BUA

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチャルハンドオーバー

3.4.2.2 Third party call control (3pcc)を用いたバイキャスト

本節では、Third party call control (3pcc) [64]を活用した SIP ベースのバイキャストの実現について説明する。この 3pcc を用いたバイキャスト手法は、3pcc を用いたトランスコードサービス起動方法[65]を参考にしている。

STEP A: セッション確立

3pcc を用いたバイキャスト手法は前節で説明した B2BUA を用いたバイキャスト手法と異なり、図 3 - 21 のステップ A に記載の MN と CN のセッション確立時に、HOAS が関わらない。MN と CN とが直接セッション確立するものであり、図 3 - 21 のステップ A に記載のメッセージ(1)～(3)によりセッションが確立される。ここで、SIP INVITE メッセージ(1)の SDP ペイロードには高速無線アクセスに応じたメディアケーパビリティが、200OK メッセージ(2) の SDP ペイロードには CN のメディアケーパビリティが、それぞれ含まれる。これらメッセージの SIP ヘッダや SDP ペイロード部などを図 3 - 22 に示す。

STEP B: バーチャルハンドオーバー

B2BUA を用いたバイキャストと同様、バーチャルハンドオーバーを実施する際、それまで MN-CN のエンド-エンド間で確立されていたマルチメディアストリームは、HOAS 経由となる。この際の HOAS の、ストリームの複製、トランスコード、バイキャスト、という一連の処理も B2BUA を用いたバイキャストと同様となる。B2BUA を用いたバイキャスト手法との違いは、MN-CN 間のメディアストリームを HOAS 経由にする方法である。その方法を以下で説明する。

3.2 に記載のネットワーク探索と、3.3 に記載のネットワーク選択を経て、MN が高速無線アクセスネットワークからセルラアクセスネットワークへの切り替えを決めると、MN は CN に SIP Re-INVITE メッセージ(4)を送信する (図 3 - 21 のステップ B)。ここで、この SIP Re-INVITE には SDP を付けない。すると、このメッセージを受信した CN は、Offer としての SDP (CN のメディアケーパビリティ)を含む 200OK メッセージ(5)を MN へ送信する。続いて MN は、HOAS にてストリームの複製、トランスコード、バイキャストを行うべく、HOAS へ SIP INVITE メッセージ(6)を送信して、HOAS とのセッションを確立する。このメッセージには、MN の高速無線アクセス用のメディアケーパビリティ、セルラ用のメディアケーパビリティに加え、CN のメディアケーパビリティを含める。ここで、メッセージ(6)の SDP ペイロードに、"a=group:BC 1 2" という記述がある。これは、SDP 中のメディア記述のグルーピングを定義する SDP

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチャルハンドオーバ

グルーピング技術[66]において、バイキャストセマンティックのためのメディアグループタグ”BC”(BiCast)を新たに導入したものである。HOASはSIP INVITEメッセージ(6)に対し、自身のメディアケーパビリティについてのSDPペイロードを含む200OKメッセージ(7)をMNへ送信する。それに対し、MNはACKメッセージ(8)にてHOASへ返信する。これにより、MNからのメディアストリームはHOAS経由となる。その後、CNから受けていた、OfferとしてのSDPを含む200OKメッセージ(5)に対し、AnswerとしてのSDP(HOASのケーパビリティ)を含むACKメッセージ(9)をCNへ送信する。これにより、CNからのストリームはHOAS経由となる。上記の処理により、B2BUAを用いたバイキャストと同様に、図3-21のaに示すHOASでのバイキャストが開始される。

STEP C: バーチャルハンドオーバ完了

バーチャルハンドオーバが終了すると(図3-21のb)、MNはReplacesヘッダ[67]を含むSIP INVITEメッセージ(10)をCNへ送信する。Replacesヘッダは、既存のSIPダイアログを新たなSIPダイアログに論理的に置換する際に用いるものであるが、本提案では、セルラネットワークを経由するパスをプライマリのメディアパスにするために用いる。つまり、SIP INVITEメッセージ(10)により、メディアパスからHOASを除外するとともに、MNの高速無線アクセスインタフェースとCN間で確立されていたSIPダイアログを、MNのセルラインタフェースとCN間のダイアログで置き換える。その結果、HOASにおけるリソースがリリースされるとともに、SIPダイアログはMNのセルラインタフェースとCN間だけとなる。

3.4.2.3 B2BUAを用いたバイキャストと3pccを用いたバイキャストの比較

本節では、B2BUAを用いたバイキャストと3pccを用いたバイキャストについて比較する。

B2BUAベースのバイキャストの利点は、その柔軟性にある。B2BUAはSIPメッセージやペイロードの書き換えが可能であることから、例えばHOASがドメイン間に位置している場合、NAT traversalも簡単に実現できる。さらに、図3-19と図3-21を比較すると、バーチャルハンドオーバに係るシーケンスが、3pccベースよりもB2BUAベースの方がシンプルであることが分かる。

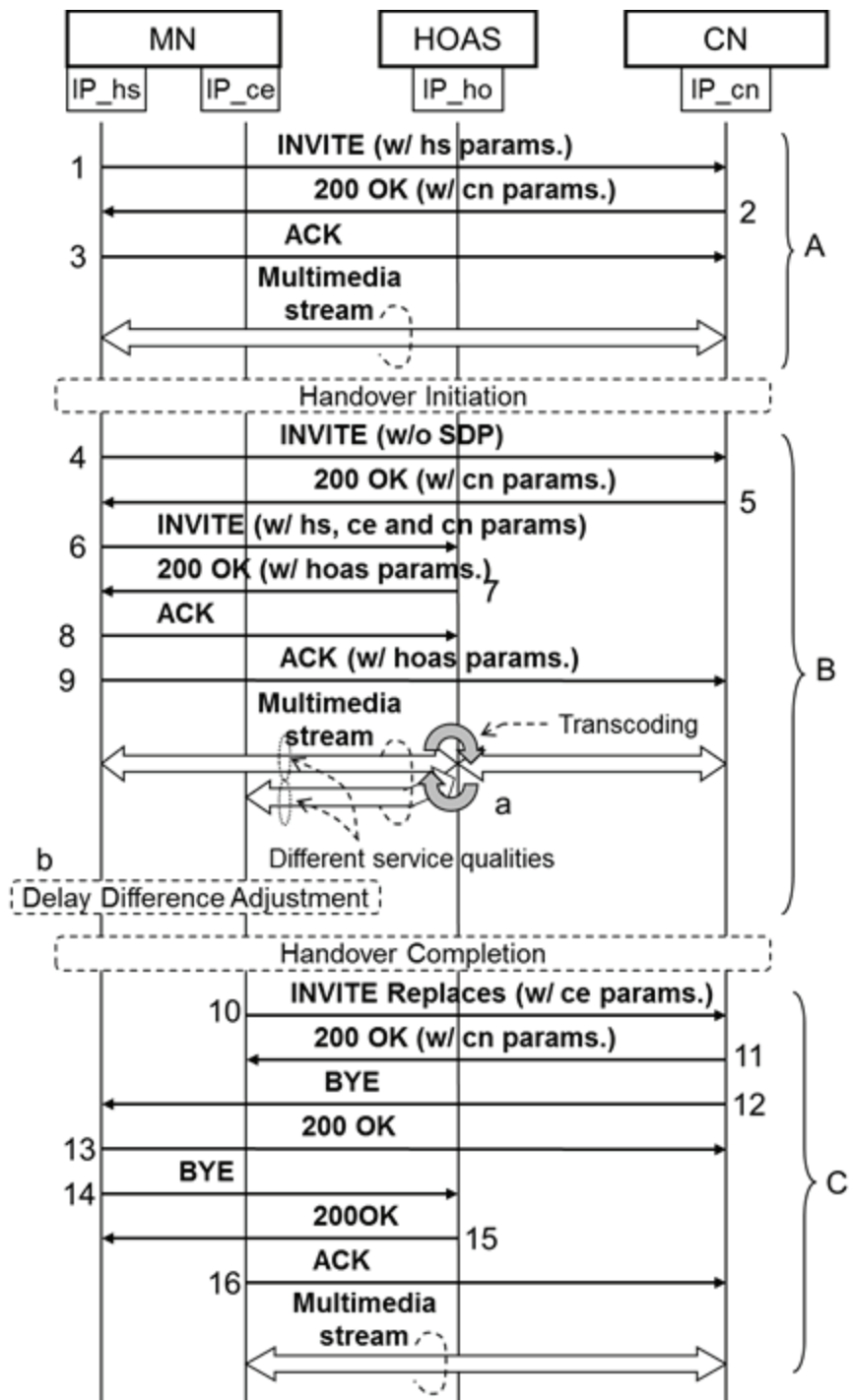


図 3 - 21 3pcc を用いた異品質ストリームバイキャストのハンドオーバーシーケンス

Figure 3-21: Handover sequence of the proposed difference quality stream bicasting using 3pcc

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチャルハンドオーバー

```
Message 1: MN(hs) - CN
INVITE sip:CN@example.com SIP/2.0
To: sip:CN@example.com
From: sip:MN@example.com; tag=dc2c13
Call-ID: 858ec@example.com
Contact: sip:MN@IP_hs

m=video 10000 RTP/AVP 96 97
c=IN IP4 IP_hs
a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
a=framerate:5
b=AS:200
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600

Message 2: CN - MN(hs)
SIP/2.0 200 OK
To: sip:CN@example.com; tag=12aae
From: sip:MN@example.com; tag=dc2c13
Call-ID: 858ec@example.com
Contact: sip:CN@IP_cn

m=video 20000 RTP/AVP 97
c=IN IP4 IP_cn
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600

Message 3: CN - MN(hs)
SIP/2.0 200 OK
To: sip:CN@example.com; tag=12aae
From: sip:MN@example.com; tag=dc2c13
Call-ID: 858ec@example.com
Contact: sip:MN@IP_hs

m=video 20000 RTP/AVP 96
c=IN IP4 IP_hs
a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
a=framerate:5
b=AS:200
a=mid:1

m=video 50002 RTP/AVP 97
c=IN IP4 IP_cn
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600
a=mid:2

m=video 40002 RTP/AVP 97
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600
a=mid:3

Message 4: MN(hs) - HOAS
INVITE sip:HOAS@IP_ho SIP/2.0
To: sip:HOAS@example.com
From: sip:MN@example.com; tag=143ea
Call-ID: 5caad@example.com
Contact: sip:MN@IP_hs

a=group:BC 1 2
m=video 30002 RTP/AVP 96
c=IN IP4 IP_ho
a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
a=framerate:5
b=AS:200
a=mid:1

m=video 50002 RTP/AVP 97
c=IN IP4 IP_hs
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600
a=mid:2

m=video 40002 RTP/AVP 97
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600
a=mid:3

Message 5: CN - MN(hs)
SIP/2.0 200 OK
To: sip:CN@example.com; tag=12aae
From: sip:MN@example.com; tag=dc2c13
Call-ID: 858ec@example.com
Contact: sip:CN@IP_cn

m=video 20000 RTP/AVP 96 97
c=IN IP4 IP_cn
a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
a=framerate:5
b=AS:200
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600

Message 6: MN(hs) - HOAS
INVITE sip:HOAS@IP_ho SIP/2.0
To: sip:HOAS@example.com
From: sip:MN@example.com; tag=143ea
Call-ID: 5caad@example.com
Contact: sip:MN@IP_hs

a=group:BC 1 2
m=video 30002 RTP/AVP 96
c=IN IP4 IP_ho
a=rtpmap:96 MP4V_ES/90000
a=framerate:5
b=AS:200
a=mid:1

m=video 50002 RTP/AVP 97
c=IN IP4 IP_hs
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600
a=mid:2

m=video 40002 RTP/AVP 97
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600
a=mid:3

Message 7: MN(hs) - CN
INVITE sip:CN@example.com SIP/2.0
To: sip:CN@example.com
From: sip:MN@example.com; tag=f32ed
Replaces: 858ec@example.com
;to-tag=12aae;from-tag=dc2c13
Call-ID: 18425@example.com
Contact: sip:MN@IP_ce

m=video 10000 RTP/AVP 97
c=IN IP4 IP_ce
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600

Message 8: MN(hs) - CN
INVITE sip:CN@example.com SIP/2.0
To: sip:CN@example.com
From: sip:MN@example.com; tag=f32ed
Replaces: 858ec@example.com
;to-tag=12aae;from-tag=dc2c13
Call-ID: 18425@example.com
Contact: sip:MN@IP_ce

m=video 10000 RTP/AVP 97
c=IN IP4 IP_ce
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600

Message 9: MN(hs) - CN
INVITE sip:CN@example.com SIP/2.0
To: sip:CN@example.com
From: sip:MN@example.com; tag=f32ed
Replaces: 858ec@example.com
;to-tag=12aae;from-tag=dc2c13
Call-ID: 18425@example.com
Contact: sip:MN@IP_ce

m=video 10000 RTP/AVP 97
c=IN IP4 IP_ce
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600

Message 10: MN(ce) - CN
INVITE sip:CN@example.com SIP/2.0
To: sip:CN@example.com
From: sip:MN@example.com; tag=f32ed
Replaces: 858ec@example.com
;to-tag=12aae;from-tag=dc2c13
Call-ID: 18425@example.com
Contact: sip:MN@IP_ce

m=video 10000 RTP/AVP 97
c=IN IP4 IP_ce
a=rtpmap:97 MP4V_ES/90000
a=framerate:15
b=AS:600
```

図 3 - 22 3pcc を用いたバイキャスト手法におけるメッセージ詳細

Figure 3-22: Message detail in the bicast using 3pcc

一方、B2BUA は、バーチャルハンドオーバー実施有無に関わらず、扱うセッションに関するステータスを全て管理し、当該セッション上の SIP ダイアログを処理しなければならないため、B2BUA (つまり HOAS) の処理負荷が高くなる。また、B2BUA ベースだと、セキュリティに関する課題も出てくる。SIP[49]では、発着信端末間の相互認証とともに、メッセージ内容の暗号化やメッセージ内容の完全性 (改竄有無の検証) の担保を可能にする S/MIME[68]の利用が推奨されている。ところが、メッセージ内容が S/MIME で暗号化されると、HOAS は MN や CN から送られてくる SDP ペイロードの書き換えなどを行えなくなってしまう。つまり、B2BUA ベースのバイキャストアプローチを利用する場合、S/MIME を使ったメッセージの暗号化や改竄検証ができなくなる。

3pcc ベースのアプローチの場合、HOAS の負荷を下げるのが可能となる。また、3pcc ベースであれば、S/MIME を用いたメッセージ内容の暗号化や改竄検証を行うこ

表 3 - 4 B2BUA ベースと 3pcc ベースのアプローチの比較
Table 3-4: Comparison of B2BUA-based and 3pcc-based approaches

	B2BUA-based	3pcc-based
Flexibility	○	×
Number of messages	○	△
HOAS load	×	○
Security	△	○

とができるため、セキュリティに関する課題は払拭できる。これは、3pcc ベースのアプローチを採用する場合、HOAS は一つのエンド端末としてセッションに参加するため、HOAS 宛の SIP メッセージは HOAS の公開鍵を用いて暗号化できるためである。

以上の観点をまとめたものを表 3 - 4 に示すが、表 3 - 4 より、一般的には 3pcc ベースのアプローチの方が好ましいといえる。一方、サーバ台数増強等で HOAS の負荷が問題にならなかつたり、HOAS が信頼できるドメイン（通信オペレータドメイン等）に設置されるのであれば、B2BUA ベースにおける柔軟性による利点から、B2BUA ベースのアプローチを採用することも考えられる。

3.4.2.4 ハンドオーバ支援サーバ機能の分離

HOAS が MN と CN 間の経路から遠く離れた場所にある場合（例えば、MN が東京、CN が名古屋、HOAS がドイツにある場合）、図 3 - 19 や図 3 - 21 におけるステップ B や C において、MN - CN 間のパスを HOAS 経由に切り替えたり、HOAS 経由から MN - CN 間のパスに戻したりする際、サービスが瞬断する可能性がある。この課題に対しては、3.4.2.1 に記載した、マルチメディアストリームを常に HOAS 経由とする処理とすることで解決することができる。また、別の解決手段としては、HOAS の機能を二つに分けることが考えられる。つまり、HOAS の機能を、①制御機能（SIP サーバ機能）と、②メディア処理機能（トランスコード及びバイキャスト機能）に分け、それぞれの機能を異なるサーバに実装し、メディア処理機能を積んだサーバをコンテンツデリバリネットワーク（CDN）のコンテンツサーバのように、各地に分散配置する。制御機能が実装されたサーバは、図 3 - 19 や図 3 - 21 におけるステップ B で、CDN におけるレプリカサーバ選択技術[69]等を用いて最適な（MN - CN 間のパスに最も近

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

くに位置する)メディア処理機能を積んだサーバを選択することで、サービス断を防ぐことが可能になると考えられる。

3.4.3 バーチカルハンドオーバにおける遅延時間差吸収手法

本節では、バーチカルハンドオーバ中の映像サービス中断を防止する、遅延時間差吸収 (Delay Difference Absorption: DDA)手法を説明する。ビデオサービス等を利用している際に発生するネットワーク切り替えによる余分な遅延やジッタを吸収することは、途切れのないビデオサービスを提供するうえで重要である。また同時に、特にビデオ電話等の双方向リアルタイムサービスにおいて再生遅延を短くすることは、サービス利用者の体感品質を高める上で必要となる。これは、ビデオストリーミングなどの片方向の映像サービスと異なり、双方向リアルタイムサービスではインタラクティブ性が重要になるためである。通常、これら遅延・ジッタの吸収とインタラクティブ性の両立は、再生バッファ制御技術 ([70]など)によって実現される。

しかしながら、3.4.1にも記載した通り、異種無線ネットワーク環境では、同一の無線ネットワーク環境に比べて、無線ネットワーク毎に伝送速度や通信遅延時間が大きく異なることから、バーチカルハンドオーバ中にバッファアンダーランや受信パケットの誤順序等の発生でサービスが中断しかねない。Kawadaらは、信頼性向上のためのバックアップ回線を有する映像配信システムにおいて、メイン回線からのデコード後の映像とバックアップ回線からのデコード後の映像を、フレームごとのビデオ信号レベルで比較することで遅延時間調整を行い、メイン回線とバックアップ回線間の回線切り替えを実現した[71]が、このような負荷の高い処理をモバイル端末で実施することは困難である。

提案する DDA 手法は、このように上述の課題を受けて考案したものであり、3.4.2に記載の異品質バイキャスト手法と組み合わせることで、3.4.1にて掲げた一つ目の要件：

“(R1) 双方向リアルタイムサービス利用時であっても、アプリケーションレベルで途切れを生じない

を実現できる。DDA手法は、MNでの映像のデコード前に実行されるため、MNは1本のビデオストリームのみをデコードすればよく、軽い処理負荷で異種無線ネットワーク間の遅延差を吸収できることになる。

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

以下では、MN から見てダウンリンク方向 (CN/HOAS から MN 方向)の DDA 手法について記載するが、アップリンク方向については HOAS が MN の役割を担うことになる。

DDA 手法を実施するためには、

1. HOAS が異品質ストリームのバイキャストを実施する際、二つのストリーム間で同期できるように、メディア同期情報をそれぞれのパケットに含める

2. MN は二つのストリームをそれぞれ受信するため、受信バッファを二つ持つことが必要となる。

通常だと、HOAS がバイキャストするのは二つの独立したマルチメディアストリームであるため、RTP に基づくタイムスタンプで両ストリームを比較することはできない。そのため、上述の 1 の処理の通り、HOAS はバイキャストを行う際、アプリケーションレベルでの同期再生のための時間情報を、下位レイヤのパケットヘッダ (例えば RTP ヘッダ)に付加する。これにより、MN は同期再生のための時間情報をデコードする前に認識することができることになる。具体的な DDA の処理を、高速無線アクセスネットワークからセルラネットワークへの切り替えを例として図 3-23 に示す。

高速無線アクセスネットワークからセルラネットワークへバーチカルハンドオーバを実施する際、MN は図 3-23 の時刻 T に示すように、それぞれのネットワークからのストリームを別々の受信バッファへ格納する。ここで、例えば、高速無線アクセスネットワークの方がセルラネットワークよりも網内遅延時間が短いとすると、そのままストリームを切り替えた場合、一時同じ映像が再生されるか、少し映像が止まった状態が発生しうる。例えば、図 3-23 の例では、時刻 T において、高速無線アクセスネットワークからは同期再生のための時間情報として $t+1$ のパケットが到着している一方、セルラネットワークからは同 $t-1$ のパケットが到着している。この際、MN の画面に同 t の映像が再生されているとすると、次のタイミング時刻 $T+1$ で再生されるべきは同 $t+1$ の映像となるが、このタイミングでセルラネットワーク側へ経路及び再生バッファを切り替えるとデコーダには同 $t-1$ のパケットが渡されることになる。つまり、画面で再生済みの $t-1$ の映像が再度再生されるか、所望の $t+1$ のパケットがセルラネットワークで到着するまで映像がフリーズすることになる。

よって、DDA 手法では、両ネットワーク間の遅延差を吸収するため、映像の再生速度を一時的に早送りにしたりスロー再生にしたりする。図 3-23 の例では、高速無

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

線アクセス側の受信バッファからパケットを取り出す速度を半分になっている。そして、図3-23の時刻 $T+3$ のように、両バッファ間で同期再生のための時間情報が等しくなったら、デコードする再生バッファを高速無線アクセス側の受信バッファからセルラ側の受信バッファへ切り替える。ここで、実際の切り替えタイミングは、MPEGやH.264を映像圧縮技術として用いている場合は、イントラフレームの再生タイミングとしている。また、DDA手法は、遅延差に基づいてのみ実施しており、無線アクセスシステムには非依存である。

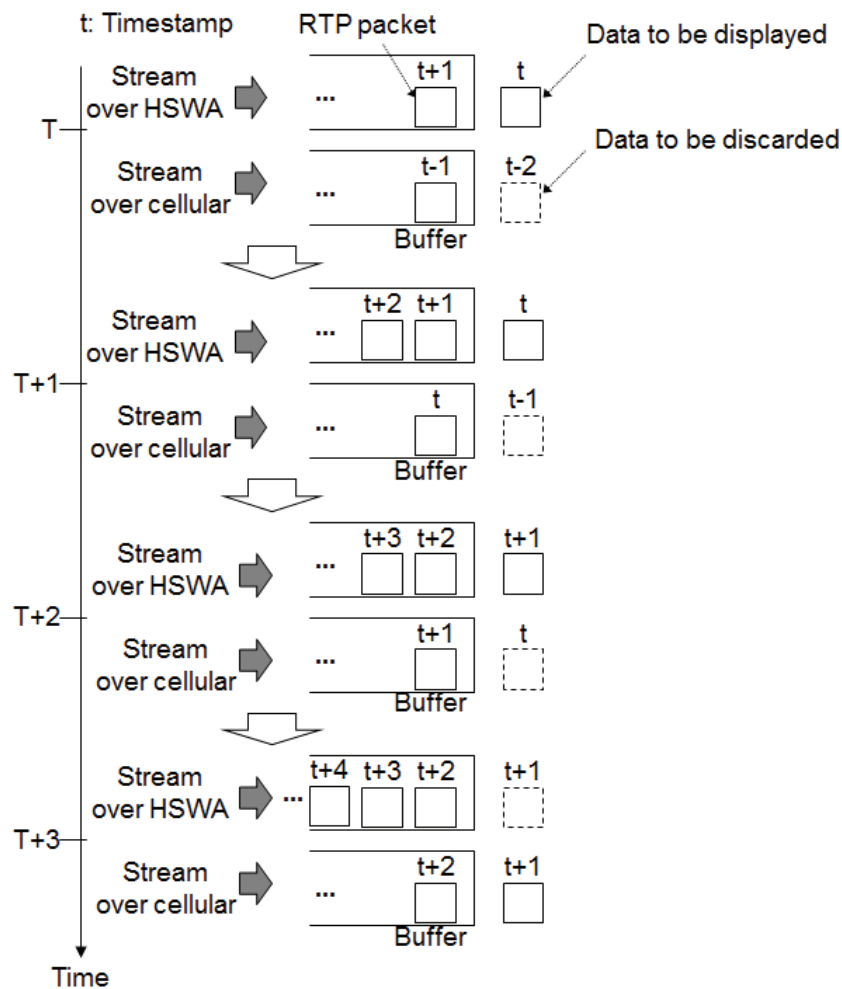


図3-23 高速無線アクセスネットワークからセルラネットワークへのハンドオーバにおけるDDA処理例

Figure 3-23: DDA process in the case of handover from high-speed wireless access network to cellular network

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチャルハンドオーバー

本章では、映像のみへ DDA 手法を適用することを考えているが、実際はユーザ体感品質上、オーディオ部分へも適用すべきである。しかしながら、上述した DDA 手法をそのままオーディオに適用しても、音程や音色が変わってしまうことからうまくいかないと考えられる。そのような課題に対しては、時間軸伸縮技術（例えば[72]）や、話速変換技術（例えば[73]）などを DDA 手法に適用することで、解決できる可能性がある。

3.4.4 提案手法の実装及び性能評価

提案する SIP ベースの異品質ストリームのバイキャスト手法を評価するため、異品質バイキャスト手法と遅延時間差吸収 (DDA) 手法を PC に実装し、図 3-24 に示すテストベッド上で性能評価を実施した。異品質ストリームのバイキャスト手法としては、実装が簡単であることから、B2BUA ベースのアプローチを採用した。また、本評価においては、双方向リアルタイムアプリケーションとして、ビデオ電話を用いた。

3.4.4.1 提案手法の実装と評価システム

利用した全 PC は、Linux (Kernel 2.4) を OS としたものであり、各 PC のスペックは表 3-5 の通りである。本実装評価の目的は、伝送速度や通信遅延時間の異なるネットワーク間でバーチャルハンドオーバーを実施した際、アプリケーションレベルでの途切れを確認することである。そのため、図 3-24 の各ノードは全て 100 Mbit/s の UTP ケーブルで接続されているものの、MN となる UE1 の二つのインタフェースは、それぞれ異なるネットワークを模擬するネットワークエミュレータに接続され、帯域を制限したり遅延を付加したりしている。なお、CN は固定網に接続するホストを想定し

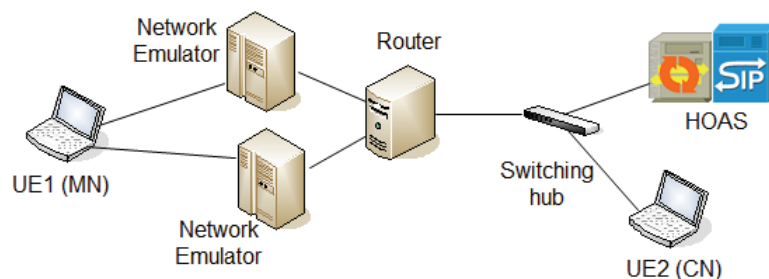


図 3-24 テストベッドネットワーク構成

Figure 3-24: Testbed network

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチャルハンドオーバー

表 3 - 5 テストベッドにおける PC のスペック

Table 3-5: PC spec on the testbed

PC		Spec.
UE1	CPU	Pentium M 1.60 GHz
	Memory	1.0 GB
UE2	CPU	Pentium M 1.60 GHz
	Memory	1.5 GB
HOAS	CPU	Pentium D 3.00 GHz
	Memory	3.0 GB

表 3 - 6 ネットワークエミュレータにおける設定値

Table 3-6: Parameter settings on the network emulators

Parameter		Value
Bandwidth (Kbps)	Cellular	500
	High-speed wireless access	1,000
Added delay (ms)	Cellular	150, 300, 450, 600, 750
	High-speed wireless access	0

表 3 - 7 ビデオ電話の設定値

Table 3-7: Parameter settings in the video phone application

Parameter		Value
Moving image compression in video phone	MPEG-4 encoder and decoder provided by KDDI R&D Labs. [75]	
Key frame interval (frame)	15	
Video phone bit rate (Kbps)	Cellular	200
	High-speed wireless access	600
Video phone frame rate (/s)	Cellular	5
	High-speed wireless access	15
Initial buffering time (ms)	300	

るため、特にネットワークエミュレータを介していない。

ここで、筆者は各ネットワークエミュレータの設定を表 3 - 6 に示す値にすることで、高速無線アクセスネットワークとセルラネットワークとを模擬するようにした。セルラネットワーク側のネットワークエミュレータに付加する遅延時間はシナリオに応じて 150 ms～750 ms 間で変化させるものとし、高速無線アクセスネットワーク側のネットワークエミュレータには遅延付加は行わないものとした。よって、セルラネッ

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

トワーク側のネットワークエミュレータに付加する遅延時間が、両ネットワークの遅延時間差となる。

また、ビデオ電話アプリケーションで用いるパラメータセットを表3-7に示す。本評価では、全到着パケットは300 msだけバッファされるものとする。また、テストベッドは図3-24に示す通り全て有線接続であり、3.2、3.3に記載の異種無線ネットワーク探索/選択を行うことができないため、バーチカルハンドオーバトリガは手動で与えられるものとする。手動でバーチカルハンドオーバトリガがUE1に与えられると、UE1は図3-19に記載のSIP UPDATEメッセージ(5)をHOASへ送信する。なお、簡単のため、本評価ではUE1とUE2間のメディアストリームは、常にHOASを経由するようにした。また、3.4.3に記載したDDA手法において、MPEG-4のPresentation time stamp (PTS)の値をアプリケーションレベルでの同期再生のための時間情報とし、これを下位レイヤとしてRTPヘッダのタイムスタンプ値(90 kHzのレート[74])にセットした。なお、MPEG-4エンコーダ/デコーダは、KDDI研究所の販売品を用いた[75]。

比較評価のために、SIPを用いたセッションモビリティ[76]に基づくハードハンドオーバ手法を併せて評価した。このハードハンドオーバ手法では、切り替え先のネットワークに合わせてメディア品質を変えることができるので、3.4.1にて掲げた二つ目の要求事項(R2)を満たすことができるものである。

3.4.4.2 性能評価

まず、セルラネットワーク側のネットワークエミュレータにて、300 msの遅延を付加した際の、提案手法とハードハンドオーバ手法を比較した。ここでは、最初に高速無線アクセスネットワークに接続しており、その後セルラネットワークへ切り替え、再度高速無線アクセスネットワークへ戻るといったシナリオの元、評価を実施した。

図3-25は、ハードハンドオーバ手法を用いた場合の、UE1における受信パケットのRTPタイムスタンプ値の遷移を示したものである。横軸は経過時間を、縦軸はタイムスタンプ値を、それぞれ示している。バーチカルハンドオーバを開始したタイミングは、図3-25上で縦の点線として描かれている。図3-25より、高速無線アクセスネットワークとセルラネットワークとの間のRTPタイムスタンプのプロットを比較すると、タイムスタンプ値の増加の傾きは等しいものの、密度が大きく異なることが分かる。これは、ビデオの再生速度はアクセスネットワークに依らず一定であるため等しい傾きになっている一方、表3-7に示すように、アクセスネットワークに応じ

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバ

てビデオのビットレートやフレームレートが異なることから、密度が大きく異なっている。ここで、図3-25から、高速無線アクセスネットワークからセルラネットワークへのバーチカルハンドオーバ前後、セルラネットワークから高速無線アクセスネットワークへのバーチカルハンドオーバ前後のいずれでも、RTPタイムスタンプレベルでの大きな途切れは見られず、連続性が保たれていることが分かった。

図3-26は、ハードハンドオーバ手法を用いた場合の、UE1におけるデコーダに渡される直前のPTS値の遷移を示したものである。横軸は経過時間を、縦軸はPTS値を、それぞれ示している。PTSはデコードされたフレームがユーザに再生される時刻である。つまり、デコーダに連続的にデータが渡され、かつPTS値が連続していることこそが、3.4.1にて掲げた一つ目の要求事項(R1)を満たすことの証であり、ユーザ体感上重要な指標となる。ここで、ネットワークエミュレータで付加されたセルラネットワーク側の遅延時間が300msであり、かつRTPレベルでは図3-25から分かるようにほとんど途切れは無かったが、図3-26より、デコーダへデータが入力されるレベルだと、高速無線アクセスネットワークからセルラネットワークへのバーチカルハンドオーバ前後、セルラネットワークから高速無線アクセスネットワークへのバーチカルハンドオーバ前後のいずれの場合も、300msよりも大きな1.5s程度の途切れが観測されたことが分かる。初期バッファ時間に加え、デコーダが次のキーフレームを待たなければいけなかったことが、再生再開まで予想以上の時間を要した原因だと考えられる。また、図3-26では、バーチカルハンドオーバの際のPTS値のギャップを横点線で示しているが、高速無線アクセスネットワークからセルラネットワークへのバーチカルハンドオーバ前後より、セルラネットワークから高速無線アクセスネットワークへのバーチカルハンドオーバ前後の方が、PTS値のギャップが大きい。これは、高速無線アクセスネットワークの方が短い遅延時間であるため、セルラネットワークから高速無線アクセスネットワークへの切り替えでは、セルラネットワーク経由でもらうべきパケットに先駆けてPTS値の大きいパケットを高速無線アクセスネットワーク経由で受信したためだと考えられる。

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー

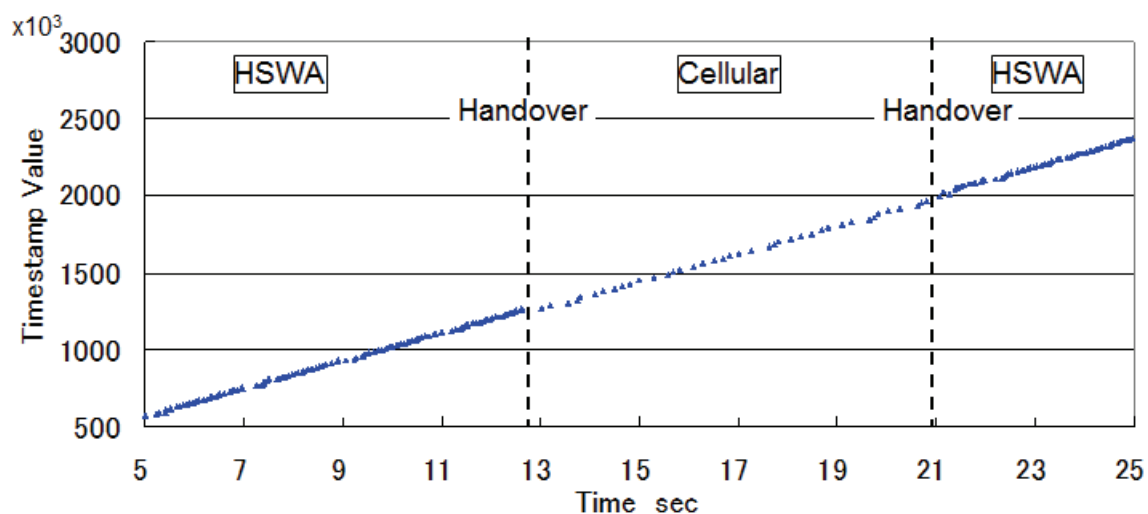


図 3 - 25 ハードハンドオーバー手法利用時の受信パケットにおける RTP タイムスタンプ値の遷移 (ネットワーク間の遅延差: 300 ms)

Figure 3-25: Transition in RTP timestamp of received packets under the hard handover method. (The delay difference between the two access networks is 300 ms)

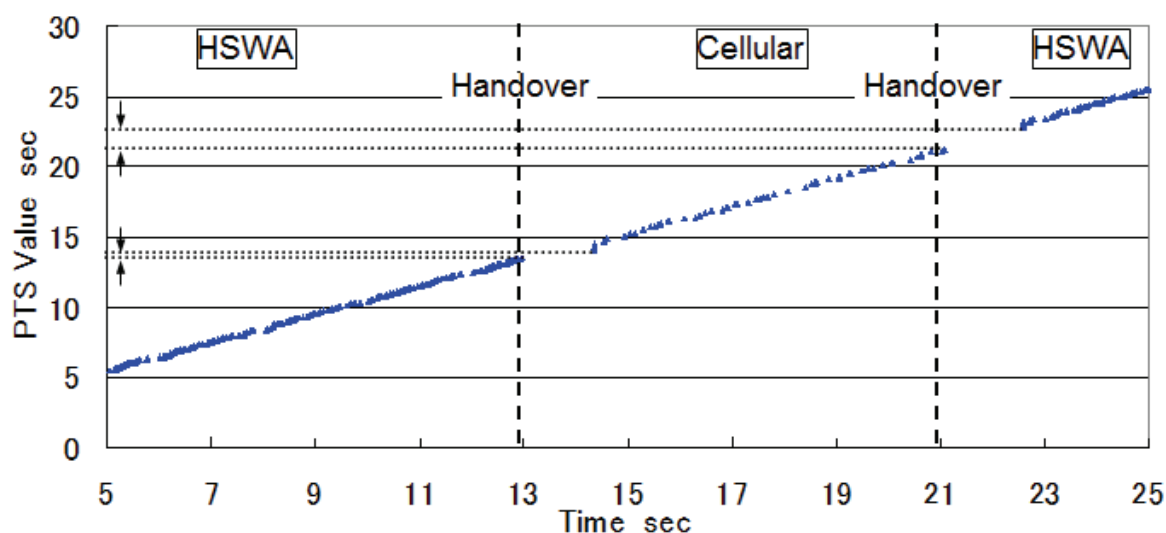


図 3 - 26 ハードハンドオーバー手法利用時のデコーダ入力直前の PTS 値の遷移 (ネットワーク間の遅延差: 300 ms)

Figure 3-26: Transition in PTS value right before input to the decoder under the hard handover method. (The delay difference between the two access networks is 300 ms)

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー

一方、提案手法利用時のデコーダ入力直前のPTS値の遷移を示す図3-27から、提案手法を用いることで、デコーダへの入力データの連続性及びPTSの連続性を実現できていることが分かる。これは、例えばバーチカルハンドオーバーが発生しても、ユーザは連続した映像を楽しむことを意味する。提案手法では、バーチカルハンドオーバー開始後、DDA手法が実施され、その後ハンドオーバー処理が完了する。そのため、図3-27には、ハンドオーバー開始ポイントと、ハンドオーバー完了ポイントをそれぞれ縦点線にて示している。

図3-28は、提案手法を用いた場合の、UE1における受信パケットのRTPタイムスタンプ値の遷移を示したものであるが、バーチカルハンドオーバー実施中、二つのストリームを同時に受信していることが分かる。異品質バイキャストにより、UE1が連続するビデオデータを受信できていることを示しており、これがDDA手法の実施を可能にしている。また、UE1が品質の異なるストリームを受信していることは、それぞれのストリームのプロットの密度が異なることから分かる。以上より、3.4.1にて掲げた二つの要求事項を提案手法が満たしていることが分かる。

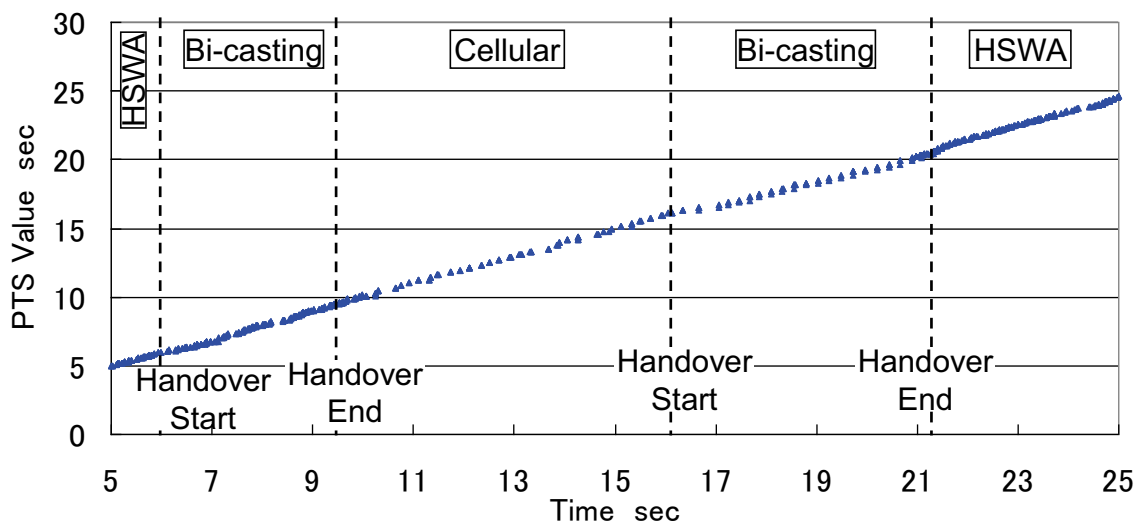


図3-27 提案手法利用時のデコーダ入力直前のPTS値の遷移 (ネットワーク間の遅延差: 300 ms)

Figure 3-27: Transition in PTS value right before input to the decoder under the proposed method. (The delay difference between the two access networks is 300 ms)

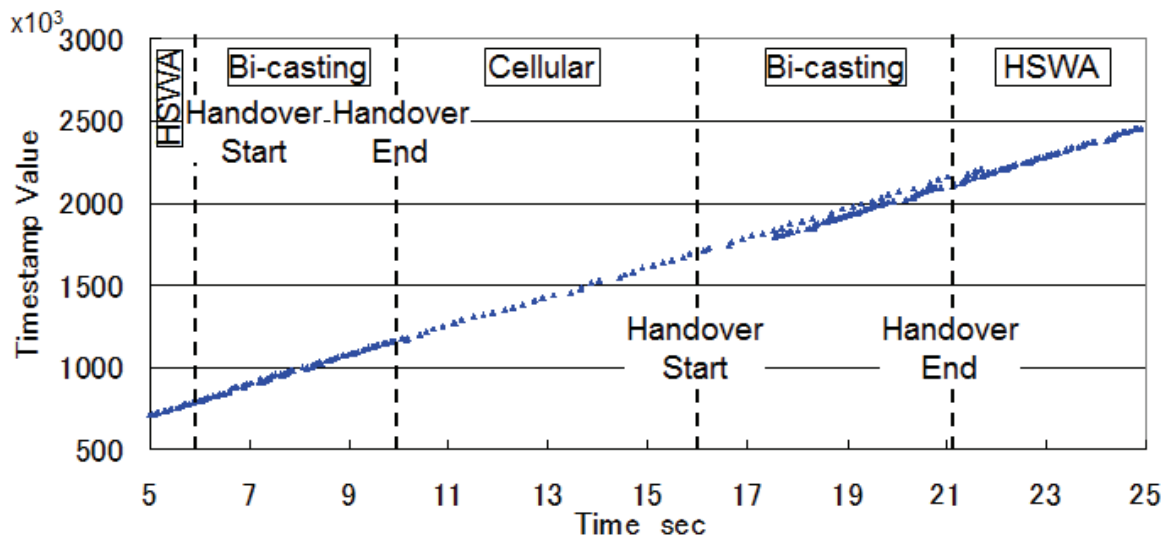


図 3 - 28 提案手法利用時の受信パケットにおける RTP タイムスタンプ値の遷移 (ネットワーク間の遅延差: 300 ms)

Figure 3-28: Transition in RTP timestamp of received packets under the proposed method. (The delay difference between the two access networks is 300 ms)

続いて、セルラネットワーク側のネットワークエミュレータに付加する遅延時間を 150 ms から 750 ms の間で変化させた場合の、デコーダに入力されるデータの途切れを評価した。上述のように、ユーザの体感に直結する指標がデコーダに入力されるデータの連続性であるため、低レイヤ (RTP レイヤ)での連続性ではなく、アプリケーションレイヤで評価を実施した。図 3 - 29 は、横軸をセルラネットワーク側のネットワークエミュレータに付加する遅延時間、つまり、両ネットワーク間の遅延時間差とした場合の、提案手法とハードハンドオーバー手法におけるデコーダへの入力データの途切れ時間を示したものである。ハードハンドオーバー手法では、ネットワーク遅延時間差が大きくなるにつれて、デコーダへ入力されるデータの途切れ時間が線形に広がっていることが分かる。一方、提案手法では、異品質バイキャスト手法と DDA 手法により、アクセスネットワーク間の遅延時間差に依らず、デコーダへ入力されるデータに途切れが見られず、連続性を保てていることが分かる。図 3 - 29 では、提案手法を用いた場合の途切れが 200 ms 程度見られるが、これは、本評価におけるセルラネットワークでのフレームレートが 5 frame/s となっており、この影響を受けた値と考えられる。

また、図 3 - 30 は、セルラネットワーク側のネットワークエミュレータでの付加遅延時間を 750 ms にした際の、セルラネットワークから高速無線アクセスネットワー

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー

クへの切り替え前後の PTS 値の遷移の拡大図である。本図からも、ハードハンドオーバーでは、デコーダに入力されるデータ及び PTS 値ともに大きな途切れを生じている一方、提案手法を用いることで、デコーダに入力されるデータ及び PTS 値両方の連続性を保てていることが分かる。

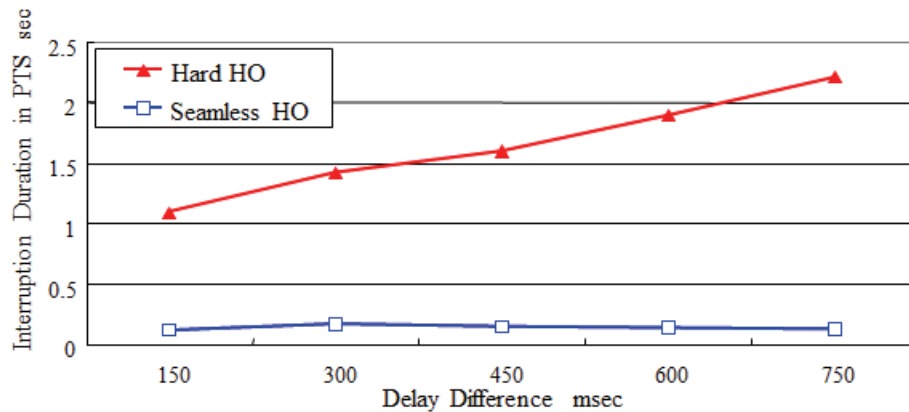
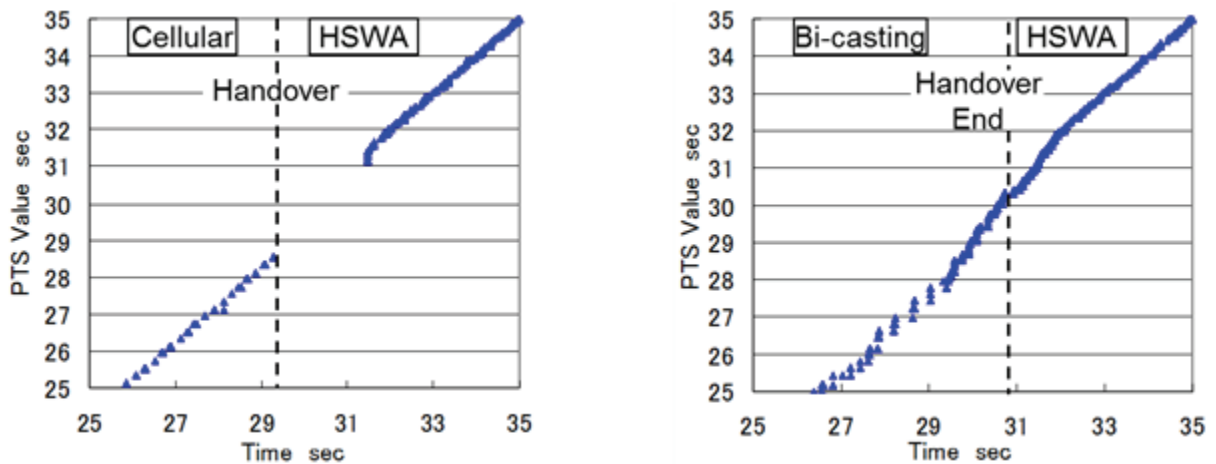


図 3 - 29 アクセスネットワーク間の遅延時間差と映像の途切れ

Figure 3-29: Delay difference between the access networks and the video interruption duration



(a) ハードハンドオーバー手法

(a) Hard handover method

(b) 提案手法

(b) Proposed method

図 3 - 30 高速無線アクセスネットワークへの切り替え前後におけるデコーダ入力直前の PTS 値の遷移 (ネットワーク間の遅延差: 750 ms)

Figure 3-30: Transition in PTS value right before input to the decoder at the vertical handover from cellular to high-speed wireless access. (The delay difference between the two access networks is 750 ms)

3.5 まとめ

本章では、複数の異なる無線ネットワークがその特徴を補完しあう異種無線ネットワークにおける、無線システムを切り替えるバーチカルハンドオーバ処理について、そのステップを三つに分けて論じた。最初のステップである「ネットワーク探索」ステップでは、現在接続している無線ネットワーク（例えばセルラ）と別のネットワーク（例えば無線LAN）を探索するステップであり、効率的な探索が求められる。そこで、MNより各無線システムのカバレッジ情報をサービスエリアマップサーバと呼ぶネットワーク上のサーバに集約し、当該情報を元にMNの存在する場所に応じた無線システム情報配信を行う提案を行った。また、セルラの電波強度の変動を監視することで、MN単体で効率的に無線LANエリアを探索する手法についても提案した。二つ目のステップである「ネットワーク選択」ステップでは、探索の結果発見したネットワークに接続するか否かを選択するフェーズであり、代表的な手法を紹介した。最後の「ネットワーク切り替え」ステップでは、実際に無線システムを切り替えるフェーズになるが、双方向リアルタイムアプリケーションを対象に、サービスが途切れず、かつ接続先無線ネットワークに応じたサービス品質に適応的に切り替わるハンドオーバ手法を提案した。提案手法は、ハンドオーバ時に品質の異なる複数のストリームをバイキャストする手法と、ハンドオーバ前後のネットワークの遅延時間差を吸収する手法から成る。テストベッドによる性能評価の結果、ユーザの体感に直結するアプリケーションレベルで、途切れが生じないことを示した。

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

本章ではまず、遅延／切断耐性ネットワークの概要を説明する。その後、当該ネットワークの展開に向けた課題について述べる。当該ネットワークの展開には、通信オペレータのメリットにつながる検討が必要であると思われることから、通信オペレータが直面している課題であるセルラトラヒックの急増と、当該トラヒックの時空間の特徴を調べる予備実験について説明する。その後、遅延／切断耐性ネットワークの技術を適用し、セルラトラヒックをオフロードする RoCNet と呼ぶ手法を提案する。最後に、コンピュータシミュレーションによる性能評価結果を紹介する。

4.1 遅延／切断耐性ネットワーク

これまでは、“いつでも・どこでも”通信を可能にすることを目的に通信技術が発展し、通信の仕組みも、ネットワークへアクセス可能であることを前提としたものであった。一方、実際は、ネットワークへのアクセス手段の提供には、時間的・空間的な制限がある。そこで、発想を転換し、遅延が極めて大きい状況や、ネットワークとのリンクが切断しても、ネットワークと非同期で情報伝達を実現できる遅延／切断耐性ネットワーク形態が考案された[77][78][79]。遅延／切断耐性ネットワークでは、時間的制限に対応するためのユーザ通信端末でのデータの「蓄積」と、空間的制限に対応するためのユーザ通信端末によるデータの物理的な「運搬」、そしてデータを別のユーザ通信端末へ送信する「転送」からなる、蓄積運搬転送と呼ばれるメッセージ中継技術が用いられる[9](図4-1)。DTNでは、この蓄積運搬転送メッセージ中継技術を、バンドルプロトコル[80]が動作するバンドルレイヤにて実現した。バンドルレイヤは、アプリケーション層のすぐ下に位置し、下位のレイヤ(TCP/IPやMACレイヤ等)を抽象化することで、様々なトランスポートレイヤを用いることができる。

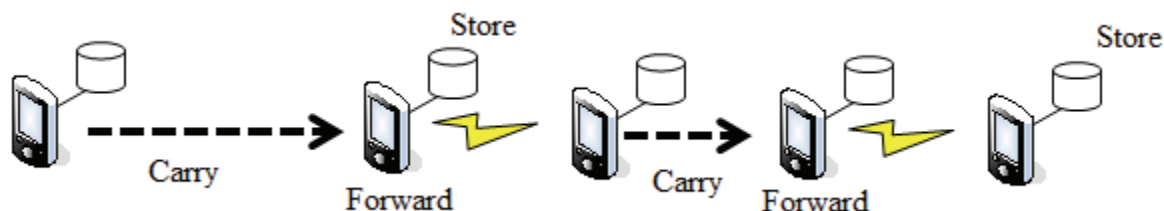


図4-1 蓄積運搬転送メッセージ中継

Figure 4-1: Store-carry-forward message switching

4.2 展開に向けた課題

遅延／切断耐性ネットワークは、元々、深宇宙や海上、深海といった劣悪な通信環境をターゲットにしていた。しかし、そのロバスト性の高さから、様々な用途が検討されている。例えば、Haddadiらは、ローカルでの広告配信と効果測定のためのクリック情報収集にDTNを活用する検討をしている[81]。また、筆者は、通常のセルラネットワークにおける局所的なデッドスポット等による通信失敗を、DTNを活用することで回避する提案を行った[82][83]。さらに、DTNを用いて災害発生時の情報共有を実施する検討もある[84]。災害等で一時的に通信インフラが利用不可になった場合の活用が、一般ユーザの立場からも非常に有用であることは、2011年3月に発生した東日本大震災を振り返れば想像に難くない。ところが、現実には遅延／切断耐性技術は研究レベルに留まっており、一部のニッチなマーケットを除いて、実用化の方向が見えていない。この、普及へのデスバレーについては、国内のDTN研究者が共通して認識している課題であり、DTNの方向性および可能性について議論する場として、2012年に「DTNとその未来に関するワークショップ」が設置された。本論文においては、このデスバレーの要因は、遅延／切断耐性ネットワーク形態のマネタイズの難しさ、つまり遅延／切断耐性ネットワークを導入することによる通信オペレータのメリットを見出しづらいことにあると考える。

4.3 通信オペレータが直面している課題とセルラトラヒックの時空間特徴

そこで、通信オペレータが直面している課題について考える。スマートフォンの登場に伴うモバイルデータ通信への大きな需要により、セルラトラヒック量は予測を上回る勢いで伸びており、セルラシステムのリソースが逼迫され始めている[85][86]。通信オペレータ各社は、増加するトラヒック量がセルラ基地局のキャパシティを超えないよう、キャパシティ増強目的でのマクロ基地局増設を実施している。総務省の情報通信白書[87]によると、スマートフォンの普及による通信インフラへの設備投資が近年増加傾向にあることから、セルラトラヒックの急増が課題の一つといえる。

次に、セルラのトラヒックの特徴について述べる。セルラトラヒックは時間・空間的に一様に分布しているわけではなく、エリアの特徴に応じたトラヒック遷移がある

第4章 蓄積運搬送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

[88] (図4-2). トラヒック遷移の違いはユーザの移動性 (滞在場所の変更)に起因するものであり, 例えば, 住宅地では夜~深夜にかけてトラヒックが増加する傾向にあり, 一方, オフィス街では勤務時間帯である日中のトラヒック量が多い. さらにターミナル駅周辺をカバーする基地局では, 朝晩の通勤ラッシュ時のトラヒックが高くなる [89]など, ユーザが多く滞在する場所・時間に大きく依存するものとなる. また, 特にオフィスや店舗が立ち並ぶ都市部では多くのユーザが集中することから, 住宅地に比べて, 単位エリアあたりの最繁時トラヒック量は多くなる [90].

ここで, 筆者はセルラトラヒック負荷が都市部でどのように変化するか調査した. 通信オペレータ以外, 基地局の実際のトラヒック量を直接収集することは困難であるため, 測定するスループット値からセルラトラヒック負荷を推定することとした. なお, セルラトラヒック負荷の定常的な時間変動を観察するため, 約2ヶ月に渡りLTE回線を使ってスループットの測定を続けた. 以下にその詳細を述べる.

スループット測定を行うに当たり, 筆者はAndroidスマートフォン上で動く簡単なアプリケーションを開発した. このアプリケーションは, 1時間に1, 2回の頻度でスループットを測定する. スループットは, 早稲田大学の研究室内に設置したWebサーバから1MBのデータをダウンロードすることで測定した. プロトコルにはHTTPを用い, アプリケーションレベルのスループットとした (TCP/IPヘッダ等は考慮していない). また, スループット測定直前には, 毎回ICMPエコーメッセージを5回送信し, 往復遅延時間 (Round trip delay: RTT)も観測した. ICMPエコーメッセージの送信先は, 上記Webサーバとした. さらに, 当該アプリケーションは, RTT及びスルー

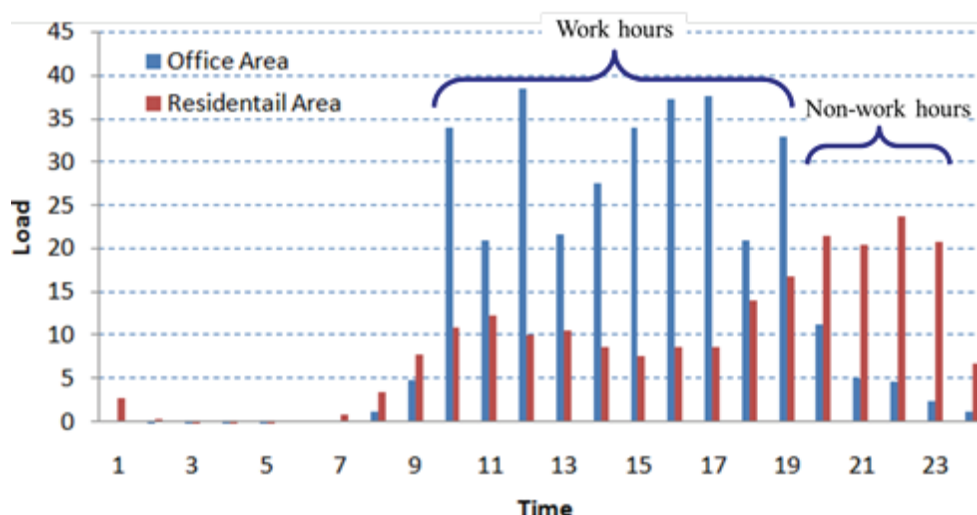


図4-2 オフィス街と住宅地における時間帯毎のセルラトラヒックの負荷変動 [88]

Figure 4-2: Hourly mobile traffic load in an office and a residential areas [88]

表 4 - 1 スループット測定諸元
Table 4-1: Throughput measurement

Item	
Measurement period	About two months
Measurement items	Throughput RTT RSRP RSRQ SNR
Measurement interval	One or twice /hr
Measurement location	Shinjuku, Tokyo (JP)
Equipment in use	Smartphone, Sony Xperia Z
OS	Android 4.2.2
Cellular system	LTE(, HSPA)

プット測定時の LTE 無線品質を記録した。ここで、無線品質は、Reference Signal Received Power (RSRP), Reference Signal Received Quality (RSRQ)及び Signal to Noise Ratio (SNR)である。これら無線品質は、Android の標準 API から取得可能である。通信回線には MVNO (Mobile Virtual Network Operators: 仮想移動体通信事業者)を介した LTE 回線を用いた (契約上、通信速度に特別な制約はない)。また、測定場所は早稲田大学の研究室内の机上とし、給電しながら放置した。大学周囲は、オフィスビルが並ぶ一方、集合住宅も多い環境である。上述したスループット測定に関する条件を表 4 - 1 に示す。

まず、RSRP 及び RSRQ の変化について確認する。RSRP は、LTE の基地局 (セル) から送信される下りリンクの参照信号の受信電力である。よって、RSRP は、スマートフォンの場所 (周囲の電波環境)が変わらなければ、変化しないものである。RSRQ は、LTE セルから送信される下りリンクの参照信号の受信電力 (つまり RSRP)を、下りリンクの RSSI (熱雑音や他セルからの干渉電力を含む全受信レベル)で割った値である。図 4 - 3 に、観測した RSRP を 30 分単位の時間帯毎に平均した結果を示す。また、図 4 - 4 には、RSRP の散布図を示す。図 4 - 3, 図 4 - 4 から、RSRP は時間帯に依らずほぼ一定であることが分かる。これは、スマートフォンの置き場が研究室内の机上に固定化されており、周囲の電波伝搬環境に時間帯に依存した変化が無かったためだと考えられる。図 4 - 5 は RSRQ の時間帯毎の平均値であるが、昼間帯から夜に

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラフィックオフロード

かけて値が低下し、深夜に上昇していることが分かる。これは、昼間帯から夜にかけてはトラフィック負荷が増えてRSSIが上昇し、深夜ではトラフィック負荷が減ってRSSIが低下したためだと考えられる。

続いて、スループットの結果に移る。図4-6に、スループット結果を30分単位の時間帯毎に平均した結果を示す。図4-6から、スループットが12時台に急激に減少

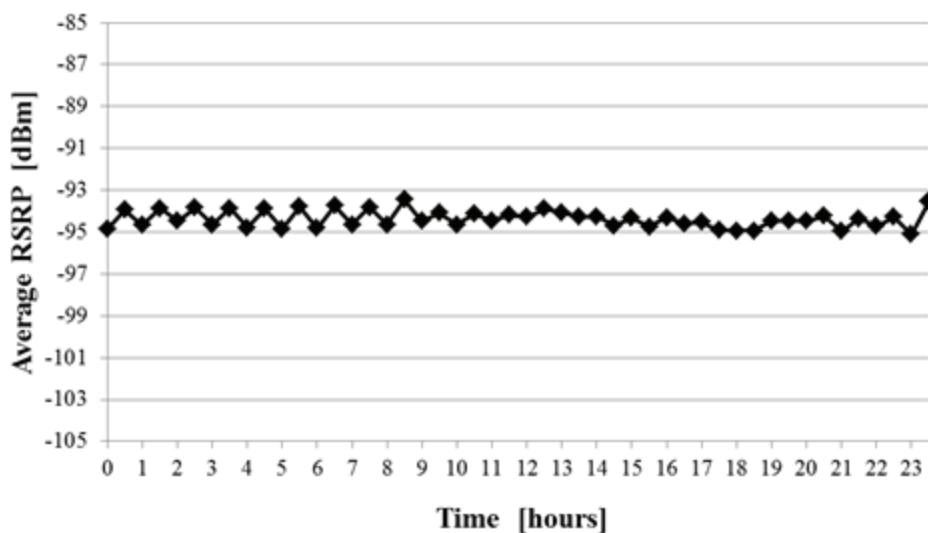


図4-3 30分単位の時間帯毎の平均RSRP

Figure 4-3: Half-hourly average RSRP in about two months

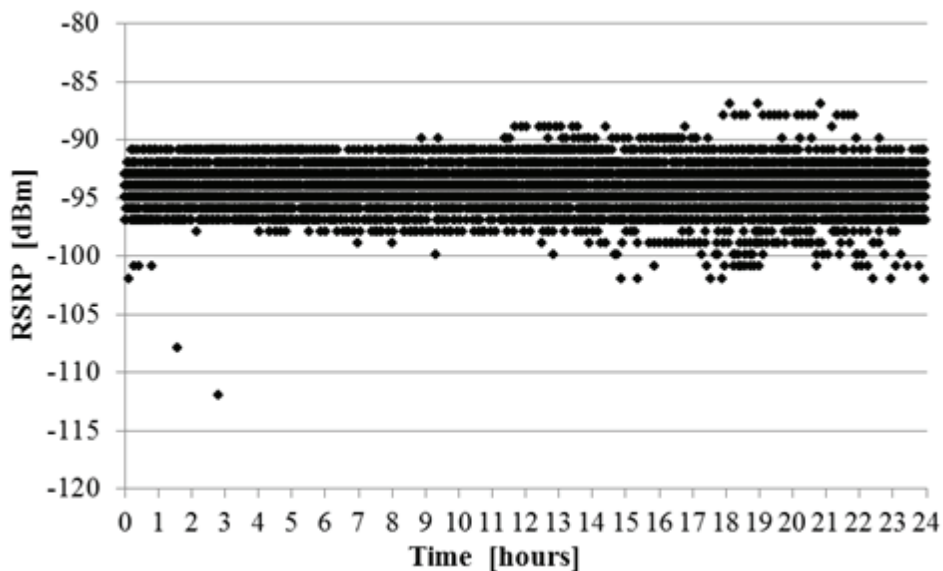


図4-4 30分単位の時間帯毎のRSRPの散布図

Figure 4-4: Scatter plot of half-hourly RSRP in about two months

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラフィックオフロード

していることが分かる。測定スマートフォンの場所は移動させておらず、図4-3より電波強度には大きな変化が見られないことから、本スループットの落ち込みは、電波要因以外と言える。ここで、12時台は多くの組織で昼休みであり、ユーザが携帯電話/スマートフォンを用いてSNSやウェブブラウズ、動画視聴等を行ったため、トラフィック負荷が高まり、スループットの急激な落ち込みにつながったのではないかと推察される。また、17時半以降23時までの間も、スループットの落ち込みがみられる。この区間に関し、17時半に急激に落ち込んだ後、スループットは上昇するが、19時以降21時半まで再度減少し続ける。前者は、就業後の通信需要であり、後者は自宅での通信需要の影響と考えられる。図4-7はスループットの散布図であるが、特に12時台の落ち込みがひどく、かつ偏差も小さいことが分かる。一方、深夜から未明にかけては、昼間帯の数倍のスループットが出ていることが分かる。このように、スループットの変動は一日の中で周期性を持ち、また時間帯によるスループットの差はかなり大きくなることが分かった。

図4-8は、SNRの測定結果を30分単位の時間帯毎に平均化したものである。LTEネットワークでは、スループットはSINRによって決まると言われており[91]、図4-8からも深夜帯に比べて昼間帯のSNRが低いことが分かる。

最後に、RTTの30分単位の時間帯毎に平均をとった結果を図4-9に示す。ここで、RTTの値としては、1試行の間に5回行うRTT測定値のうち、最小のものを当該試行の代表RTTとした。図4-9より、深夜から早朝にかけてはRTTがかなり低く抑えら

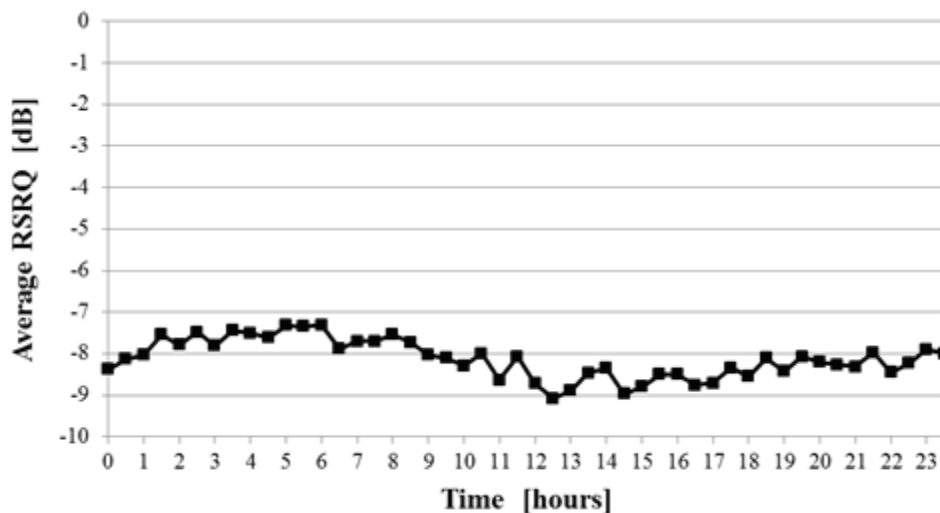


図4-5 30分単位の時間帯毎の平均RSRQ

Figure 4-5: Half-hourly average RSRQ in about two months

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

れているが、通勤時間帯から上昇し、正午前に急激に伸びて12時半にローカルピークを迎えている。また、一旦減少するが、その後も夜にかけてRTTが増える傾向になる。

以上の通り、セルラトラヒックは、同一場所でもユーザの移動等の影響で、時間帯によってトラヒック量が大きく変動することを確認できた。

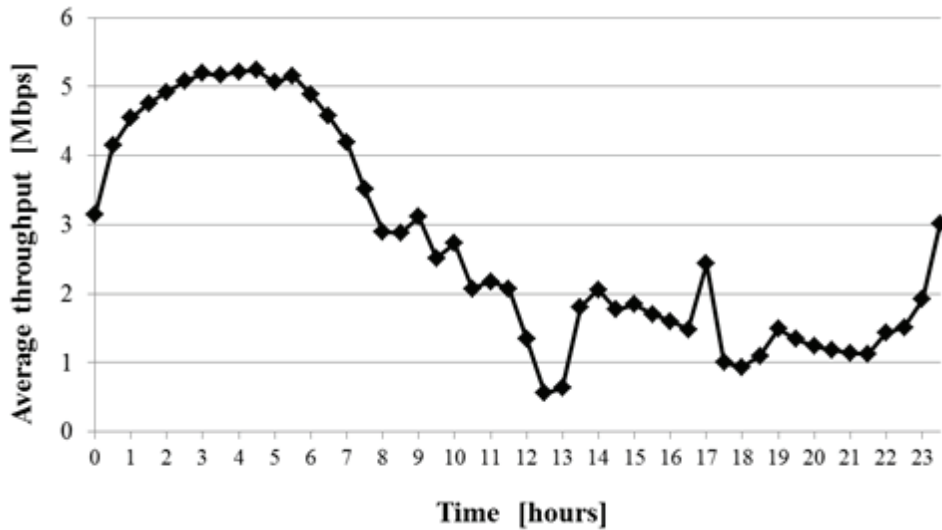


図 4 - 6 30 分単位の時間帯毎の平均スループット
Figure 4-6: Half-hourly average throughput in about two months

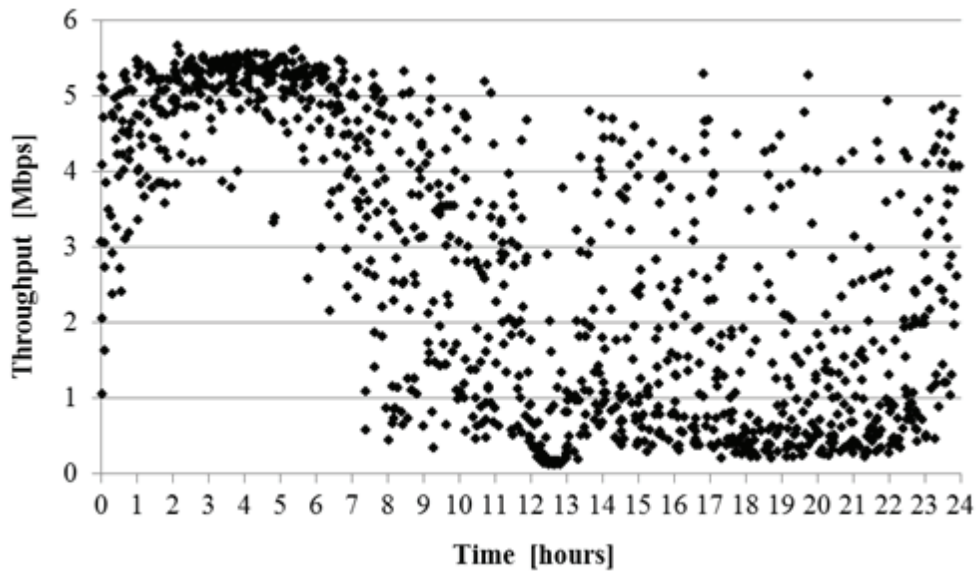


図 4 - 7 30 分単位の時間帯毎のスループットの散布図
Figure 4-7: Scatter plot of hourly throughput in about two months

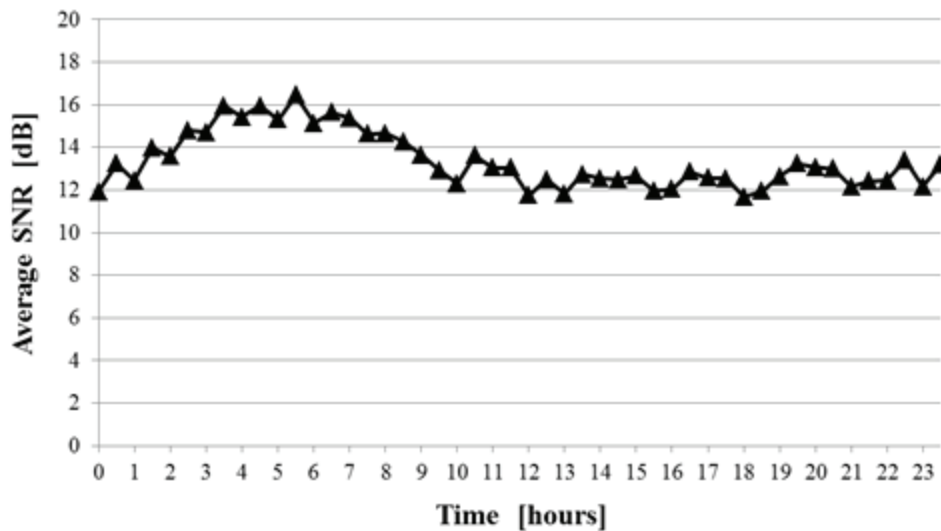


図 4 - 8 30 分単位の時間帯毎の平均 SNR

Figure 4-8: Half-hourly average SNR in about two months

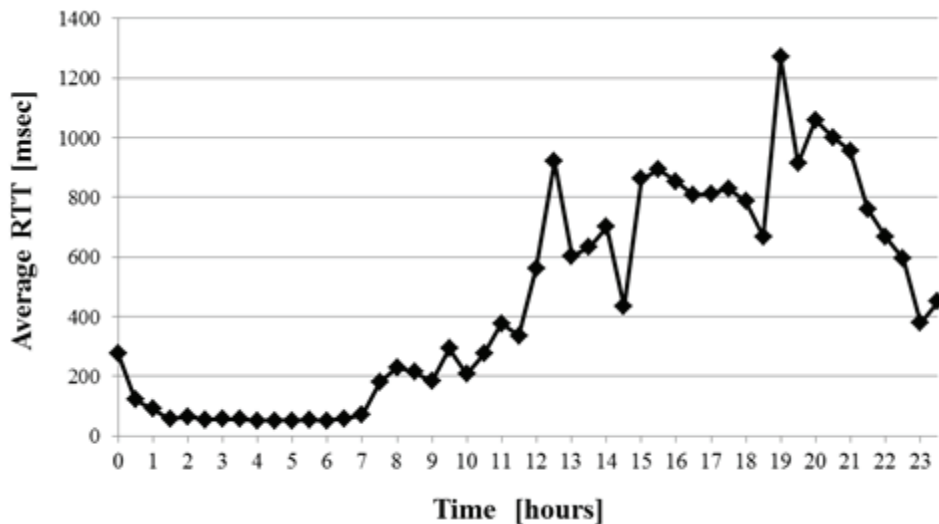


図 4 - 9 30 分単位の時間帯毎の平均 RTT

Figure 4-9: Half-hourly average RTT in about two months

4.4 RoCNet: 蓄積運搬転送を用いたセルラトラヒックのオフロード

通信オペレータは、平均トラヒック量や一日のトータルトラヒック量に基づいて基地局設備等を建設するわけではない。絶え間なくユーザにサービスを提供すべく、最繁時のトラヒックに合わせた設計を行う。最繁時間帯と、それ以外の時間帯におけるトラヒック量の差は、そのまま設備の利用率低下に繋がり、費用帯効果が低下するため、トラヒック負荷の平準化が必要である。

近年、通信オペレータは、マクロ基地局に比べて相対的に設備コストの低いピコセル（小型のセルラ基地局）や公衆無線 LAN アクセスポイントの都心部への設置を進め、設備費をおさえたトラヒック収容を目指しているが、ピコセルや公衆無線 LAN アクセスポイントも、最繁時以外の時間帯における設備利用率低下という課題をそのまま内包する。さらに、マクロ基地局が郊外で数 km、都心部で数百 m 程度のカバレッジを有するのに対し、ピコセルや公衆無線 LAN アクセスポイントは数十 m 程度の狭いエリアしかカバーできないため、設置数が増加し、設備監視、保守等の運用コストが増大する恐れもある。よって、基地局建設等の設備増強を行うことなく、最繁時間帯におけるトラヒック集中の課題に対応することが求められる。

4.4.1 関連技術

蓄積運搬転送メッセージ中継技術を利用したトラヒックオフロードに関連する研究は、比較的新しい。2010年、Hanらは、Opportunistic networkを活用してセルラダウンリンクトラヒックをオフロードする手法を提案した[92][93]。提案アーキテクチャを図4-10に示す。その提案では、まずセルラネットワークを用いて遅延許容可能なデータ（アプリケーションコンテンツ）がコンテンツサーバから k 台のコンテンツ要求端末（ハブ端末）に配信される。その後、無線LANを用いて、この k 台のハブ端末から残りのコンテンツ要求端末に対してOpportunistic networkを介したコンテンツ配信されるものである。さらに、セルラネットワークを経由するトラヒック量を最小にする k 台のハブ端末選択方法について、ユーザの移動性を考慮に入れたHeuristicアルゴリズムが提案された。また、Liらは、上記Hanらの検討に対し、トラヒックやユーザの不均質性を考慮に入れた劣モジュラ関数最大化問題として、最適なオフロード方式の定式化を行った[94]。この提案においても、コンテンツは最初にセルラネットワークを経由してハブ端末へ送信され、ハブ端末から残りの移動端末に対して、端末間通信によって配信される。また、Barberaらは、ソーシャルグラフ等を用

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラフィックオフロード

いて選択されたソーシャル上重要なユーザをハブユーザとする方式を提案した[95]. あるコミュニティ内のメンバと頻繁に会うユーザをハブユーザにし, 残りのコミュニティメンバへは, ハブユーザから端末間通信によってコンテンツが配信される.

このように, これまでの蓄積運搬転送メッセージ中継技術を利用したトラフィックオフロードに関連する研究は, コンテンツサーバからの同一コンテンツをセルラネットワーク経由でダウンロードする数を削減するという目的のもと, 他の端末へ端末間通信によりコンテンツの再配布を行うハブ端末の選択方法に関するものである. サーバから移動端末へのダウンリンクトラフィックの量は, その逆方向であるアップリンクのそれよりも多いため, ダウンリンクトラフィックの削減やオフロードは非常に重要な課題である. 一方, 移動端末を対象にしたクラウドストレージサービスの普及や, **Consumer Generated Media (CGM)**の増加などを背景に, アップリンクトラフィック量も増加していることから, アップリンクトラフィックのオフロードの検討を無視するわけにはいかない. また, TD-LTEなどの時分割多重 (TDD)方式では, アップリンクトラフィック量の削減が実質的にダウンリンクリソースの増加に繋がることを考えると, アップリンクトラフィックのオフロードは益々重要になる. さらに, 上述したように, コスト低減に繋がる設備の利用率向上のためには, 最繁時トラフィックの低減が非常に重要であるが, 従来研究ではこの観点からの検討が行われていない.

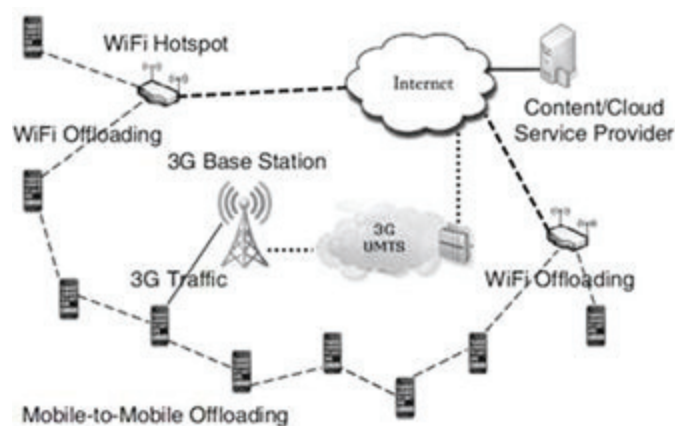


Figure 1: The MADNet architecture.

図 4 - 10 Opportunistic network を活用したトラフィックオフロード[92]

Figure 4-10: Traffic offloading using opportunistic network [92]

4.4.2 セルラアップリンクの空間的オフロード

本節では、通常のセルラ通信基盤に加え、端末間通信基盤としての Bluetooth や無線 LAN などの近距離無線を用いた蓄積運搬転送メッセージ中継技術を組み合わせた RoCNet (Robust cellular network) を提案する。移動端末は、通常のセルラ通信 (基地局との通信) に加え、Bluetooth や無線 LAN などの近距離無線を用いた蓄積運搬転送メッセージ中継技術に基づく通信を行うことができる。一般的に、蓄積運搬転送メッセージ中継技術を用いたデータ転送は、基地局との直接通信に比べて、低いデータ配送完了率や高いデータ配送遅延となる [96] ことから、RoCNet では、基地局にトラヒックが集中していない限り、セルラネットワークを通信手段に利用する (蓄積運搬転送メッセージ中継技術を用いない)。つまり、データ転送経路は、基地局のトラヒック負荷状態によって決定されるということである。なお、トラヒック負荷状態は、利用可能帯域幅推定技術 [97] や、3GPP で検討されている User Plane Congestion Control (UPCON) [98] における Radio Access Network (RAN) 輻輳インジケータ等を用いることで推定可能である。

図 4 - 11 は、RoCNet におけるトラヒックオフロードのハイレベルなイメージ図であり、図 4 - 12 は具体的な移動端末動作のフローチャートを示したものである。以下では、図 4 - 12 のフローチャートに基づいて移動端末の処理動作を説明する。

まず、移動端末 A がクラウドストレージ向けの自動バックアップデータ等の非リアルタイム (遅延許容) データを生成する (①) と、まずそのエリアが高トラヒックエリアか否かを確認する (②)。ここで、当該データには遅延許容時間 (例えば、60 分) が設定されているものとする。そのエリアが高トラヒックエリアでなければ、移動端末 A はデータを直接基地局へ送信する (③)。高トラヒックエリアであれば、周囲に別の移動端末がいないか Bluetooth や無線 LAN などの近距離無線を用いて探索する (④)。周囲に別の移動端末がいる場合、続いて、その移動端末が低負荷エリアへ移動しそうかを判定する (⑤)。周囲に別の移動端末が存在しない、または低負荷エリアへ移動しそうな移動端末が周囲にいない場合は、当該データの遅延許容時間を超えない限り ②～⑤ の手順を繰り返す。その間、生じられた非リアルタイムデータは移動端末 A 内で保持される。なお、遅延許容時間を超える場合は、データを直接基地局へ送信する (③)。

周囲に低負荷エリアへ移動しそうな移動端末 B が存在する場合は、移動端末 A から移動端末 B へ Bluetooth や無線 LAN 等の近距離無線を用いてデータを送信する (⑥)。なお、移動端末 A は、移動端末 B へデータ送信後も、当該データのコピーを保持す

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

る。これは、蓄積運搬転送メッセージ中継技術によるユーザの不利益（データ配送完了率の低下）を極力減らすべく、所定時間内に当該データの配送が完了しない場合に、移動端末 A から基地局へ当該データを直接再送信する処理を行うべきだからである。詳しくは 4.5.4 にて議論する。移動端末 B はこのデータを自身に蓄積し、その後、低トラヒックエリアへ移動すると (⑦)、低負荷基地局に対して蓄積していたデータを送信する (⑧)。ここで、移動端末 B が低トラヒックエリアへ移動する前に遅延許容時間を超える場合 (⑨)は、その時点のエリアのトラヒック負荷状況に依らず、基地局へ蓄積データを送信する (⑩)。

このように、RoCNet はトラヒック量の空間的な違いに着目し、最繁時のトラヒックを最繁時間帯の異なるエリアへ分散させることで、最繁時トラヒックを抑制する。

ここで、図 4-12 の⑤において、移動端末 A は移動端末 B が低トラヒックエリアへ移動しそうか否かを判断する必要がある。RoCNet では空間的なトラヒック量の違いのみに着目しているため、移動端末 B の具体的な移動先の場所を推定する必要はない。移動端末 B が高トラヒックエリアに留まるのか、トラヒック負荷の低いエリアへ移動するかを推定できれば十分である。そこで、移動端末毎に観測する、移動端末の周囲にある基地局のトラヒック負荷状態に着目する。具体的には、移動端末毎に、周囲の基地局のトラヒック負荷量の時系列データの変動係数 (Coefficient of Variation) CV_{traf} を用いる。変動係数はデータのばらつきを表す係数である。例えば、利用可能帯域幅推定技術[97]を用いて基地局のトラヒック負荷量を推定する場合、トラヒック負荷が高いほど利用可能帯域幅が狭くなるため、利用可能帯域幅の逆数をトラヒック負荷量と定義し、定期的に利用可能帯域幅を推定することで、トラヒック負荷の時系列データの変動係数 CV_{traf} を導出することが可能となる。ここで、変動係数は、データのばらつきを表すため、高トラヒックエリアにずっと留まっている移動端末の場合、観測するトラヒック負荷の時系列データの変動が小さいことから CV_{traf} は低くなり、一方、高トラヒックエリアと低トラヒックエリアを行き来している移動端末の場合は、観測するトラヒック負荷の時系列データの変動が大きいことから CV_{traf} は高くなる。

提案手法においては、パーティクルフィルタ[99]を用いることで、過去の状態履歴に基づいた移動端末の動きとして CV_{traf} を推定する。パーティクルフィルタは、多数のパーティクルを用いて、時刻 t における CV_{traf} の確率分布を近似し、 CV_{traf} の状態値 x_t を推定するとともに、時刻 $t+1$ における CV_{traf} の状態値 x_{t+1} を予測する手法である。本論文では、予測モデルとして、以下のシンプルな一次元状態空間モデルを用い、システムモデルとしてはランダムウォークモデルを用いる。

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラフィックオフロード

$$\begin{aligned}
 x_{t+1} &= x_t + v_{t+1} \\
 v_{t+1} &\sim N(0, \sigma)
 \end{aligned}
 \tag{4-1}$$

各移動端末は、パーティクルフィルタを用いて定期的に周囲の基地局のトラフィック負荷量の時系列データの変動係数 CV_{traf} を予測する。図4-12の④において、高トラフィックエリアで移動端末Aが周囲に移動端末Bを発見すると、移動端末間でお互いの予測 CV_{traf} を交換し、移動端末Bの予測 CV_{traf} が第一の所定値以上かつ、移動端末Aの予測 CV_{traf} より第二の所定値以上高い場合、移動端末Bの方が低トラフィックエリアへ移動する可能性が高いとして、移動端末Bへデータを送信する。

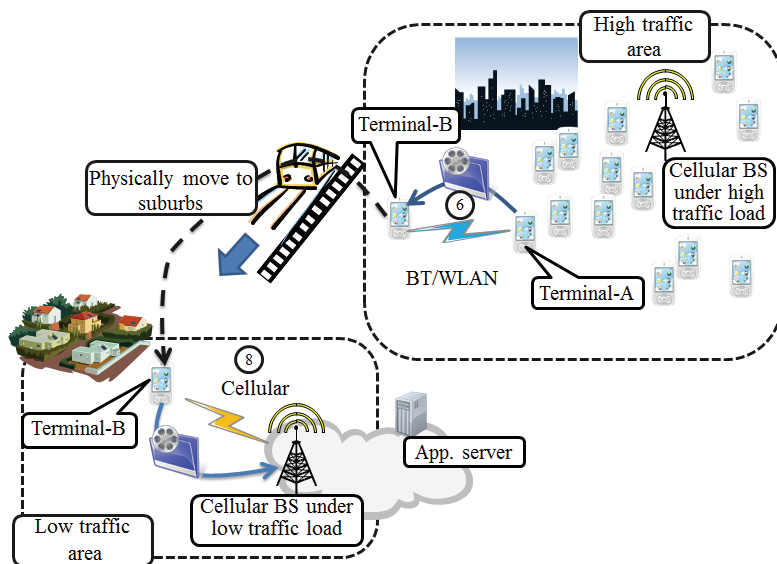


図4-11 RoCNetにおけるデータの流れの概要

Figure 4-11: High-level overview of offloaded data-flow in RoCNet

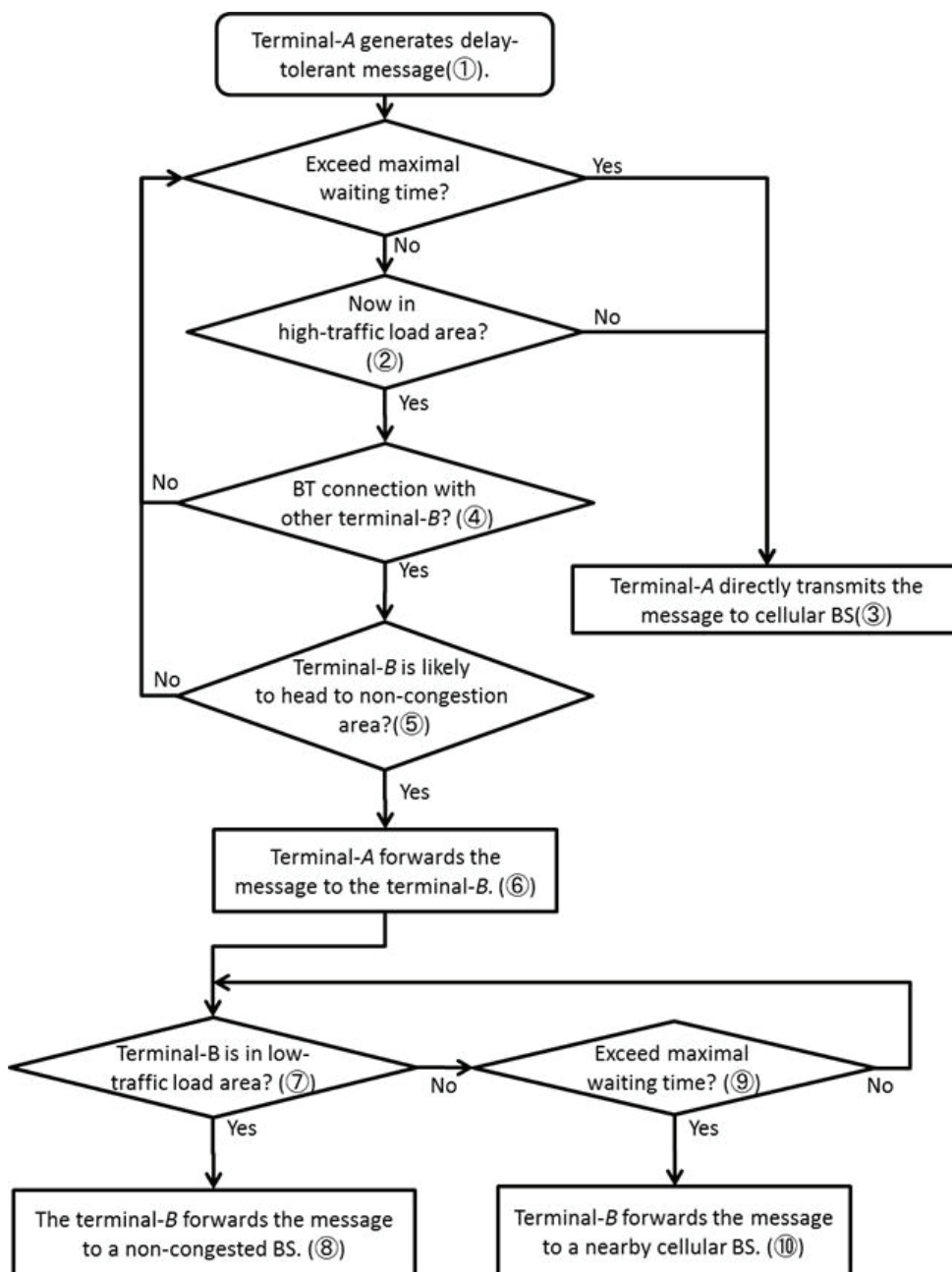


図4-12 移動端末の動作フローチャート

Figure 4-12: Flowchart of mobile terminal in RoCNet

4.4.3 トラヒックオフロード効果の評価

RoCNetによるトラヒックオフロード効果を評価するために、ネットワークシミュレータ *ONE* (Opportunistic Network Environment)[100] に RoCNet を実装し、評価を行った。*ONE* は Java で書かれたシミュレータで、多数の DTN ルーティングプロトコルと、様々なユーザモビリティモデルをサポートすることから、多くの DTN 関連研究の評価で *ONE* が用いられている。*ONE* は離散事象型ではなくタイムステップ型のシミュレータになっており、本評価では、タイムステップ値を 10 ms とした。なお、[101]によれば、*ONE* において、タイムステップ値が小さいほどシミュレーション精度が高く、100 ms のタイムステップ値で、精度に大きな問題はないと報告されている。

本評価では、特に、空間的に不均一に広がるトラヒックを、蓄積運搬転送メッセージ中継技術によって平滑化することで得られるトラヒックオフロード効果に着目する。

4.5.3.1 シミュレーションモデル

例えば、ユーザをシミュレーションエリアに一様に配置して、ランダムウォークさせるなどすると、現実的なユーザの動きと大きく乖離してしまう。そこで、本評価では、現実的なシミュレーションに近づけるべく、米国ピッツバーグ市の GIS データを読み込み、その上でユーザを動かした[102]。エリアの広さは $18.2 \times 11.7 \text{ Km}^2$ であり、ユーザ数は 280~350 人とした (シナリオによって変動)。図 4-13 はシミュレーション時の GUI 画面のキャプチャであり、黒色の線が道路を示している。実線の円はセルラのカバレッジを表しており、その中心に基地局が配置されている。基地局のカバー範囲は半径 1 km であり、ユーザが移動する道路及び滞在する住宅やオフィスをカバーしている。本評価では、ユーザを会社員とし、内勤社員と外回り社員の 2 種類に分けた。図 4-13 では、それぞれ *user*, *sales* と表されている。

ONE がサポートするユーザモビリティモデルの一つに Working Day Movement (WDM)モデル[103]がある。WDM モデルは、ユーザの一日の行動を再現するものである。つまり、ユーザは朝、自宅から会社へ向かい、会社で仕事をし、終業後に場合によっては買い物や散歩をして帰宅する。本評価では、内勤社員のモビリティモデルに WDM モデルを用いた。つまり、ピッツバーグ市郊外に広がる住宅街にある住宅から、主にピッツバーグ中心部にあるオフィスに通勤するシナリオである。内勤社員の数はシミュレーションシナリオによらず、250 人とした。

第4章 蓄積運搬送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

また、外回り社員のモビリティモデルとしては、同じく *ONE* がサポートするユーザモビリティモデルの一つである、**Shortest Path Map Based Movement (SPMBM)**モデルを用いた。SPMBM モデルは、現在の位置からランダムに選定した行き先へ最短経路で向かうモデルである。最短経路は、地図情報ベースのダイクストラ法に基づいて決定される。また、行き先は、予め定義したインタレストポイント（オフィスや住宅の場所からなる計 841 ヶ所）の中からランダムに選択される。行き先に到着したら所定の時間だけその場所に滞在し、その後、再度行き先を決めることを繰り返す。外回り社員の数は、シミュレーションシナリオによって、30, 50, 100 人と変化させた。

各ユーザは、シミュレーション中、 $[1, 120]$ s からランダムに選択した頻度でネットワーク内のサーバ宛のデータを生起する。ここで、データサイズの分布は、Zipf 分布を拡張した Lavalette 分布[104]に従うものとした。Lavalette 分布は次式により表現できる。

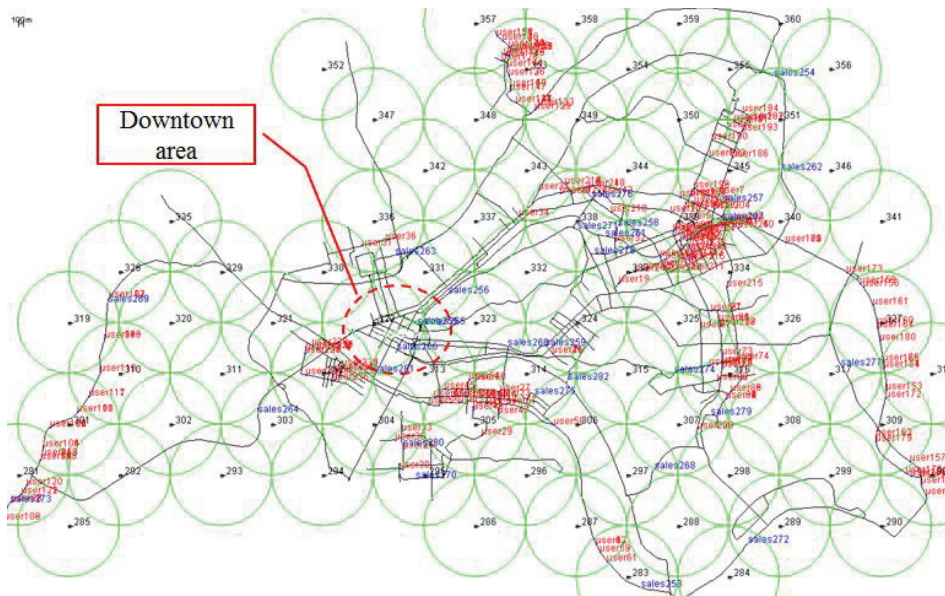
$$f(k, N) = a * \left[\frac{k * N}{N - k + 1} \right]^b \quad (4-2)$$

ここで、 N は全要素の数（対象の総数）、 k は順位である。図 4 - 14 は、本評価で用いたデータサイズの Lavalette 分布と、比較としての Zipf 分布を両対数グラフで示したものである。縦軸はデータサイズを、横軸はデータサイズで並べた場合の順位を総数 N で正規化したものを、それぞれ表している。図 4 - 14 より、途中までは両分布は同じ形で推移しているが、データサイズ順に並べた際の順位の低いものに関し、Lavalette 分布ではデータサイズが急激に落ちている。このような分布が実際のセルラネットワークにおけるデータサイズの分布であり[105]、分布の各パラメータは[105]のスマートフォントラヒックのデータを参照し決定した。また、図 4 - 15 は本データサイズの累積分布を片対数グラフにて示したものであるが、図 4 - 15 より、データサイズはロングテールであることが分かる。

シミュレーション時間は、ユーザが活動を開始する朝から活動を終える夜までの 43,200 s (12 h) とした。図 4 - 13 (a) 及び同 (b) は、それぞれ朝と日中のユーザ分布を示しており、朝はユーザの多くが郊外の自宅に留まっている一方、日中は多数のユーザがピッツバーグ中心部に集まっていることがわかる。1つのシナリオにつき異なるランダムシードを用いて 10 回ずつシミュレーションを行い、その平均値を用いた。また、本評価においては、生成された全データが遅延許容データであるとし、遅延許容時間を 3,600 s (1 h) とした。本評価で用いたパラメータを表 4 - 2 に示す。表 4 - 2 の

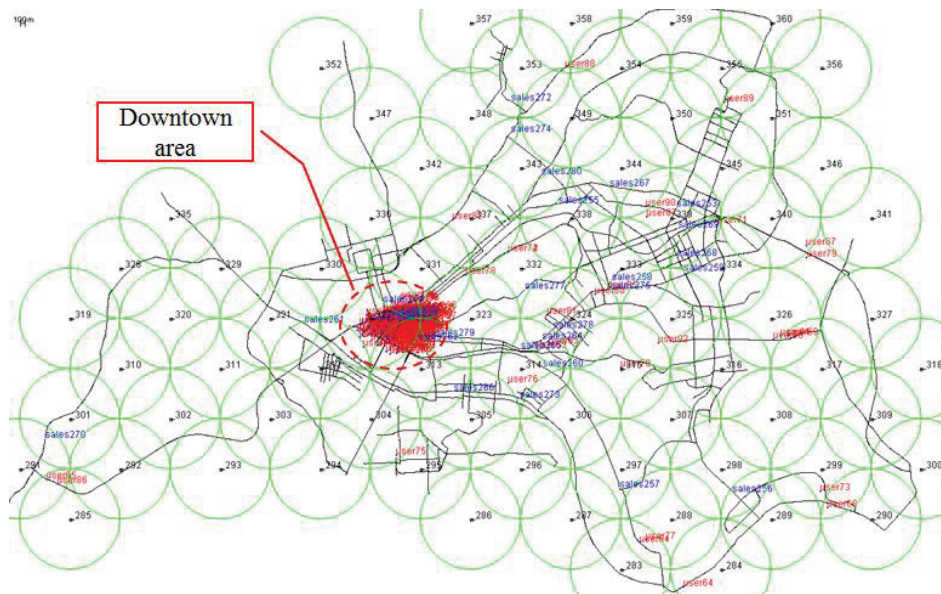
第4章 蓄積運搬送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

通り，セルラと Bluetooth の最大通信速度はそれぞれ 5.76 Mbps[106]，24 Mbps[107]とした。



(a) 朝 (シミュレーションスタート時) : ユーザ (赤字)は在宅

(a) Users (red-letter) are at home in the morning; at the start of the simulation



(b) 日中 : 多くのユーザ (赤字)はオフィスに滞在

(b) Many users (red-letter) are in their offices in the daytime

図 4 - 13 シミュレーションフィールド (実線の円がセルラのカバレッジを，黒色の線が道路を，それぞれ示している)

Figure 4-13: Simulation field overlaid on the real map around Pittsburgh (PA, USA); solid circle and a black line represent coverage of a cellular BS and a load, respectively.

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラフィックオフロード

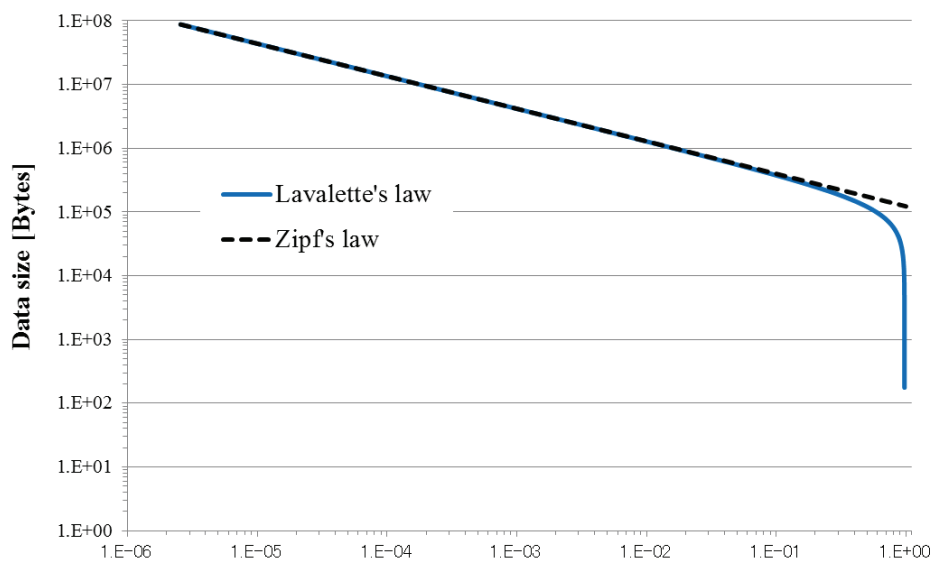


図 4 - 14 Lavalette 分布に基づくデータサイズ分布と比較としての Zipf 分布

Figure 4-14: Data size distribution that follows Lavalette's distribution, and Zipf's distribution for comparison

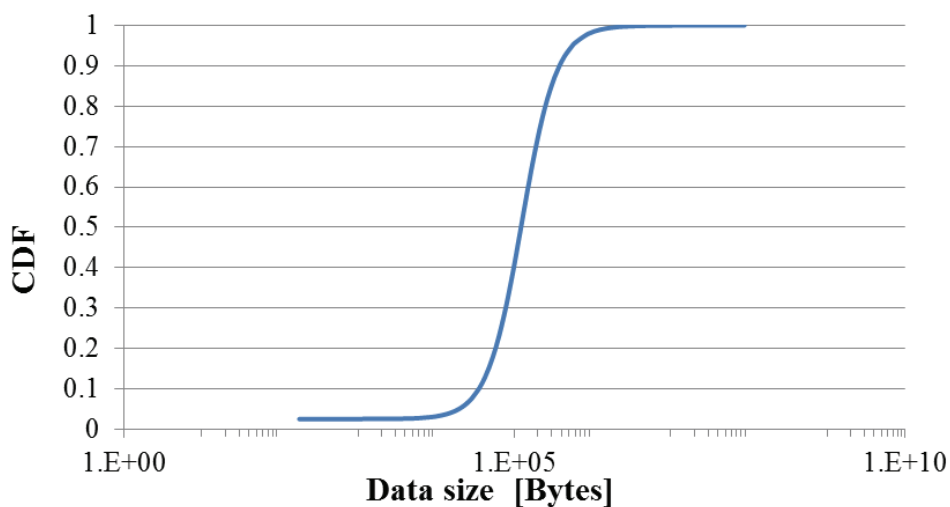


図 4 - 15 データサイズ分布の累積分布

Figure 4-15: CDF of data size in the simulation

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

表 4 - 2 シミュレーションパラメータ

Table 4-2: Simulation parameters

Parameters	Value	Remarks
<i>Area size [km]</i>	18.2 x 11.7	Around Pittsburgh (PA, USA)[102]
<i>The number of office workers</i>	250	
<i>The number of sales-persons</i>	30, 50, 100	
<i>Radio coverage of cellular [m]</i>	1,000	Exclude pico-cell
<i>Radio coverage of pico-cell [m]</i>	100	
<i>Radio coverage of Bluetooth [m]</i>	100	Assuming class 1
<i>Maximal transmission speed of cellular [Mbps]</i>	5.76 [106]	Assuming HSUPA in 3GPP release 6. Incl. pico-cell.
<i>Maximal transmission speed of Bluetooth [Mbps]</i>	24 [107]	Assuming Bluetooth 3.0 + HS
<i>Movement model</i>	Working day movement (office-workers) Shortest Path Map Based Movement (sales-persons)	
<i>Moving speed [m/s]</i>	2 - 5	Randomly selected
<i>Wait time of messengers after reaching destination s</i>	60 - 120	Randomly selected
<i>Message generation interval [s]</i>	1 - 120	Randomly selected
<i>Storage capacity in each terminal [GB]</i>	2	Works as message buffer
<i>The number of particles</i>	100	
<i>Allowed delay [s]</i>	3,600	1 hour
<i>Simulation time [sec]</i>	43,200	12 hours
<i># of simulations</i>	10	

4.5.3.2 シミュレーションシナリオ

本評価は、大きく、以下の3つのシナリオにて実施した。

- ・セルラシナリオ
- ・ピコセルシナリオ
- ・RoCNetシナリオ

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

セルラシナリオとピコセルシナリオは比較評価用のシナリオである。

セルラシナリオでは、移動端末はセルラインタフェースのみを有し、セルラ基地局とのみ通信ができる。

ピコセルシナリオは、セルラ基地局に加え、ピッツバーグ中心部のオフィス街にピコセル（小型のセルラ基地局）を配置したものである。セルラシナリオと同様に、移動端末はセルラインタフェースのみを具備するが、セルラ基地局に加え、ピコセルへも接続可能である。本シナリオでは、ピコセル数を徐々に増設し、最大10台を設置した。設置場所及び増設の順番を図4-16に示す。図4-16の基地局BS-Aが、ピッツバーグ中心部のオフィス街を主にカバーする基地局であり、日中に高負荷になる基地局である。なお、本来、基地局間（マクローピコセル間を含む）で干渉が発生し、LTEやLTE-advancedでは、干渉抑制技術（Inter-cell Interference Cancellation: ICIC, enhanced ICIC: eICIC）[108]が考案されているが、本シミュレーションでは簡単のため、基地局間の干渉は無いものとした。

RoCNetシナリオでは、移動端末はセルラインタフェースに加え、近距離通信無線としてBluetoothインタフェースを有し、セルラ基地局に加え、移動端末間でも通信ができる。なお、RoCNetシナリオのBluetoothとピコセルシナリオにおけるピコセルの通信範囲はいずれも半径100mとした。

各移動端末は、2GBのストレージを有する。セルラシナリオでは、自端末で生成したメッセージを送信するまでのメッセージバッファとして本ストレージを用いる。RoCNetシナリオにおいては、自端末で生成したメッセージに加え、他移動端末から転送されてきたメッセージを送信するまでのメッセージバッファとして本ストレージが用いられる。なお、4.5.2にて、RoCNetでは蓄積運搬転送メッセージ中継技術にて未配送となったデータに関し、データ生成元の移動端末が直接基地局へ当該データを再送信すると述べたが、簡単のため、本シミュレーションでは当該処理は実施しない。つまり、蓄積運搬転送メッセージ中継技術にて未配送となったデータは欠損となる。

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

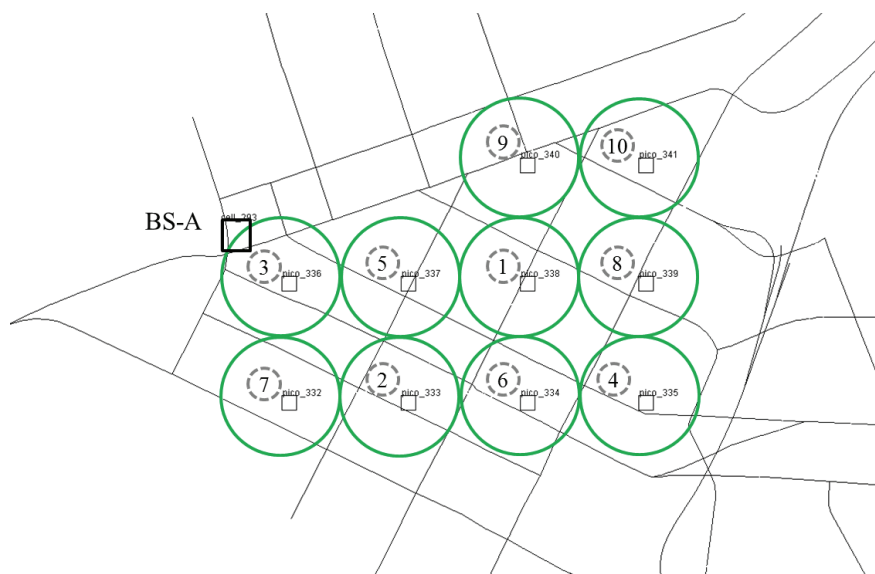


図4-16 ピッツバーグ中心部へのピコセル設置

Figure 4-17: Pico-cells installed in the downtown of Pittsburgh

RoCNet シナリオでは、接続先基地局のトラヒック負荷が、キャパシティの $2/3$ 以上となる基地局を高負荷基地局と定義し、その基地局のカバーエリアを高トラヒックエリアとした。4.5.2 にて記載したように、高トラヒックエリアでは、移動端末同士が予測 CV_{traf} を交換し、その結果に基づいて移動端末間におけるデータ送信の実施有無を決めるが、本評価では、①データ送信先候補となる移動端末の予測 CV_{traf} が 0.7 以上、かつ、②データ送信先候補となる移動端末の予測 CV_{traf} が自身の予測 CV_{traf} よりも 0.2 以上大きい場合に、データ送信先候補の移動端末の方が自身より低トラヒックエリアへ移動する可能性が高いとして、移動端末間でデータ送信を行うものとした。

ここで、上記の値を決めるため、事前に、データ送信先候補となる移動端末の予測 CV 値の閾値 (本評価で 0.7 としたものを) 0 から 1.5 まで 0.1 単位で、他の移動端末の予測 CV_{traf} と自身の予測 CV_{traf} の差の閾値 (本評価で 0.2 としたものを) 0 から 1.0 まで 0.1 単位で変化させ、「最繁時トラヒック量」、「平均トラヒック量」、並びに「平均データ配送遅延時間」を調べた。用いたシナリオは、セルラシナリオと RoCNet シナリオの両シナリオにおいて、外回り社員の数を 30 人とした場合であり、本事前調査ではシミュレーションを各 1 回ずつ実施した。また、最繁時トラヒック量と平均トラヒック量は、ピッツバーグ中心部のオフィス街を主にカバーする基地局 BS-A のトラヒック量とし、最繁時トラヒック量には単位時間 (10 分) 当たりの最大トラヒック量を、平均トラヒック量にはトラヒック負荷の高い、シミュレーション開始後 150 [min.] から 530 [min.] の間の平均トラヒック量を用いた。図 4-18 に、セルラシナリオ

第4章 蓄積運搬送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

時の結果で規格化した, RoCNet シナリオ時の最繁時トラヒック量, 平均トラヒック量, 並びに平均データ配送遅延時間をそれぞれ濃淡グラフとして示す. 最繁時/平均トラヒック量 (低い方がよい)と平均データ配送遅延時間 (小さい方がよい)を勘案し, 前述の通り, データ送信先候補端末の予測 CV_{traf} の閾値を 0.7, データ送信先候補端末の予測 CV_{traf} と自身の予測 CV_{traf} の差の閾値を 0.2 とした.

4.5.3.3 シミュレーション結果

セルラシナリオと RoCNet シナリオにおける, ピッツバーグ中心部のオフィス街を主にカバーする基地局 BS-A のトラヒック量の推移を図 4 - 18 に示す. 各シナリオにおいて外回り社員の数を 30, 50, 100 人と変化させており, 計 6 つの結果が図 4 - 18 に表示されている. 図 4 - 18 より, RoCNet シナリオでは, シミュレーション開始から 150 min. 前後より, 基地局 BS-A の負荷 (トラヒック量) が頭打ちになっていることが分かる. 一方, セルラシナリオでは, その後もトラヒック量が増加していることから, シミュレーション開始から 150 min. 前後より, 高トラヒック時における RoCNet による空間的なトラヒックオフロードによって, 高負荷時のトラヒック量が抑制できていることが分かる.

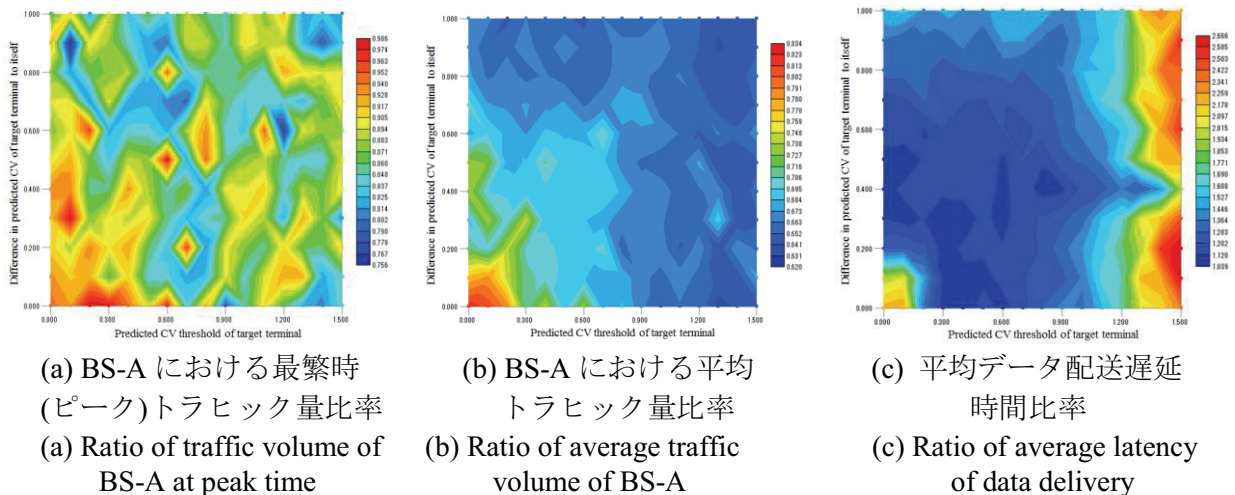


図 4 - 17 CV_{traf} の閾値と, セルラシナリオ時の結果で規格化した RoCNet シナリオの最繁時 (ピーク)トラヒック量, 平均トラヒック量, 平均データ配送遅延時間

Figure 4-16: Relationship between thresholds of CV_{traf} and each performance indices (traffic volume at peak time, average traffic volume, and average latency of data delivery)

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラフィックオフロード

表4-3に、基地局BS-Aにおける；

- ・最繁時（ピーク）トラフィック量（10分毎のトラフィック量の最大値）
- ・トラフィック負荷の高い時間帯（シミュレーション開始後150min.から530min.間）の平均トラフィック量
- ・最繁時／平均トラフィック量の標準偏差
- ・平均データ配送遅延時間
- ・平均データ配送率

を示す。ここで、データ配送遅延時間とは、データが移動端末において生起してから基地局で受信されるまでの時間を指す。また、データ配送率とは、移動端末において生起したデータが、基地局まで到達した割合である。

表4-3より、RoCNetにより、最繁時トラフィックを18～19%、トラフィック負荷の高い時間帯の平均トラフィックを36～37%だけ抑制できたことが分かる。また、トラフィックの標準偏差に関して、トラフィック負荷の高い時間帯の平均トラフィックについては両シナリオで同程度の数値となったが、最繁時トラフィックでは、RoCNetシナリオの標準偏差がセルラシナリオの標準偏差の4～9倍となった。これは、マクロで見るとRoCNetによって一定のトラフィックオフロード効果があるが、ミクロ（細かい時間粒度）で見るとオフロード量がばらついていることを意味し、RoCNetによるオフロード効果が、ユーザの移動パターンに大きく影響を受けるためと考えられる。

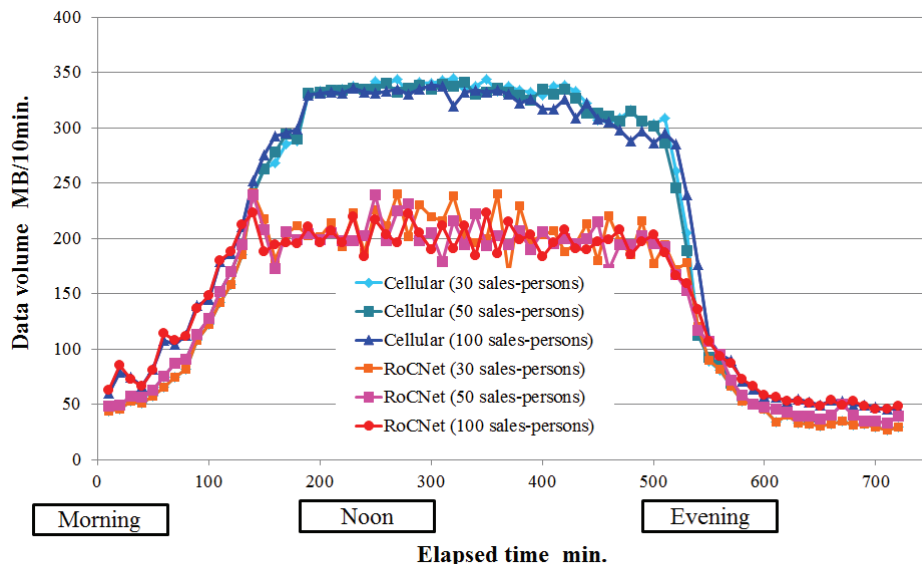


図4-18 オフィス街をカバーする基地局のトラフィック量の推移

Figure 4-18: Transition of traffic in the BS located in the business district

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラフィックオフロード

表4-3 オフィス街の基地局BS-Aにおけるトラフィック量, トラフィック量標準偏差, 平均データ配送遅延時間及び平均配送率

Table 4-3: Traffic volume and its standard deviation at BS-A located in the business district, average data delivery delay, and average data delivery rate

Scenario	Peak traffic volume [MB/10min.]	Standard deviation of peak traffic volume [MB/10min.]	Average traffic volume from 150 to 530 min. [MB/10min.]	Standard deviation of average traffic volume from 150 to 530 min. [MB/10min.]	Average data delivery delay [sec]	Average data delivery rate [%]
<i>Cellular (30 sales-persons)</i>	351.6	1.36	319.6	3.36	280.2	99.90
<i>Cellular (50 sales-persons)</i>	349.8	1.99	316.9	4.15	248.3	99.98
<i>Cellular (100 sales-persons)</i>	346.3	3.69	315.7	2.85	267.7	99.91
<i>RoCNet (30 sales-persons)</i>	289.5	12.04	204.5	5.21	375.6	100.00
<i>RoCNet (50 sales-persons)</i>	283.6	13.79	199.1	3.93	323.7	100.00
<i>RoCNet (100 sales-persons)</i>	282.8	15.19	197.6	3.76	271.6	100.00

ここで、本結果の有意性を調べるため、セルラシナリオと RoCNet シナリオの最繁忙時トラフィックの差の検定を実施した。まず、Kolmogorov-Smirnov 検定により、両シナリオにおける最繁忙時トラフィックの結果が正規分布に従うことを確認した。続いて、Welch の t 検定 [109] を実施し、最繁忙時トラフィックの両シナリオの差が、有意水準 1% で有意差が認められる結果を得た。なお、トラフィック負荷の高い時間帯の平均トラフィックについても同様の検定を実施し、同様に有意水準 1% で両シナリオの差に有意差が認められた。

また、データ配送遅延時間について、RoCNet によって、平均遅延時間が 1~34% 延びるという結果を得た。これは、RoCNet は蓄積運搬転送メッセージ中継技術を併用するため、蓄積運搬に起因するデータ配送遅延が加わったためである。

第4章 蓄積運搬送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

さらに、データ配送率については、セルラシナリオにおいて、データ送信機会待ちの移動端末におけるバッファ溢れが発生し、0.1%程度データが欠損した。これは、トラヒック集中により送信機会を十分に獲得できず、生成されるメッセージがメッセージバッファへ蓄積され、上限（本シミュレーションでは2GB）を超えたために発生したものである。一方で、RoCNetでは、蓄積運搬送メッセージ中継技術によるトラヒックオフロードによって、高トラヒックエリアにおいても十分なデータ送信機会が移動端末へ割り当てられたことから、全ての生成データが基地局まで届けられた。

ここで、RoCNetは、空間的に不均一なトラヒックを蓄積運搬送メッセージ中継技術によって平滑化することを特徴としている。そこで、空間的なトラヒックの均一性を量る指標として、Fairness Index 値[110]を用いて評価する。Fairness Index 値は公平性を測る代表的な値であり、以下のように表される。

$$\text{Fairness Index} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (4-3)$$

ここでは、単位時間（10分）毎に基地局間のトラヒック負荷のFairness Index 値を算出した。対象のばらつきが小さいほど、Fairness Index 値は1に近づき、逆に対象のばらつきが大きいほど、Fairness Index 値は1/nに近づく。本評価では、Fairness Index 値が1に近いほど、基地局間の収容トラヒック量（空間的なトラヒック量）の差異が小さいことを意味する。

各シナリオにおけるFairness Index 値を図4-19に示す。全てのシナリオにおいて、ユーザのピッツバーグ中心部への移動に伴い、Fairness Index 値が急激に低下していることが分かるが、セルラシナリオに比べて、RoCNetシナリオの低下は緩やかになっていることが分かる。図4-20は、両シナリオ（外回り社員数が50人の場合）のFairness Index 値の比を示すものであるが、ピッツバーグ中心部へのトラヒックが集中する日中に、2.5倍程度のFairness Index 値の上昇を確認できる。このことは、RoCNetによって、空間的に不均一なトラヒックの平滑化が進んだことを示している。

続いて、ピコセルシナリオを含めたピッツバーグ中心部のオフィス街を主にカバーする基地局BS-Aのトラヒック量の推移を図4-21に示す。図4-21は、各シナリオにおいて外回り社員数が100人の場合の結果である。ピコセルの数を4台程度まで増やしても基地局BS-Aのトラヒック負荷が余り変わらないのは、セルラシナリオに

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラフィックオフロード

において、通信リソース不足により送信されずに移動端末内のバッファに溜まっていた潜在需要トラフィックをピコセルが吸収できただけで、基地局 BS-A に送信されるトラフィック総量は変わらないためであると考えられる。ピコセル数が6台を超えると、基地局 BS-A のトラフィック量が徐々に低下していることから、ようやく潜在需要トラフィック以上のトラフィックを収容できたことが分かる。また、ピコセル数が8台で RoCNet と同等のトラフィックオフロード効果を、同10台で RoCNet を上回るオフロード効果を確認できる。

ここで、本評価実施前は、ピコセルによるオフロード効果はピコセル台数に線形だと考えており、そのためピコセル数をパラメータとして選択した。ところが、結果を詳しく調べると、ピコセルによるオフロード効果はピコセル台数に線形ではなかった。ピコセルはカバレッジが狭いため、オフロード効果が、ユーザの存在する場所の分布に大きく影響されるためだと考えられる。各ピコセルについて、トラフィック量の推移を集計したものを図4-22に示す。図4-22より、ピコセル3はほとんどトラフィックを収容できていない一方、隣接するピコセル5は最もトラフィックを収容していることが分かる。このように、ピコセルではそのトラフィックオフロード効果が、ユーザの存在する場所の分布に大きく依存するという課題がある。一方で、RoCNet はユーザが多く存在するほど蓄積運搬転送を実施しやすくなるため、ある程度安定したオフロード効果を期待することができる。また、図4-22より、トラフィックを多く収容したピコセル5においても、日中の時間帯以外では設備の利用率が大きく低下していることが分かる。

以上のように、RoCNet は、設備増強（基地局建設等）をすることなく、最繁時間帯におけるトラフィック集中を緩和できることが分かる。

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

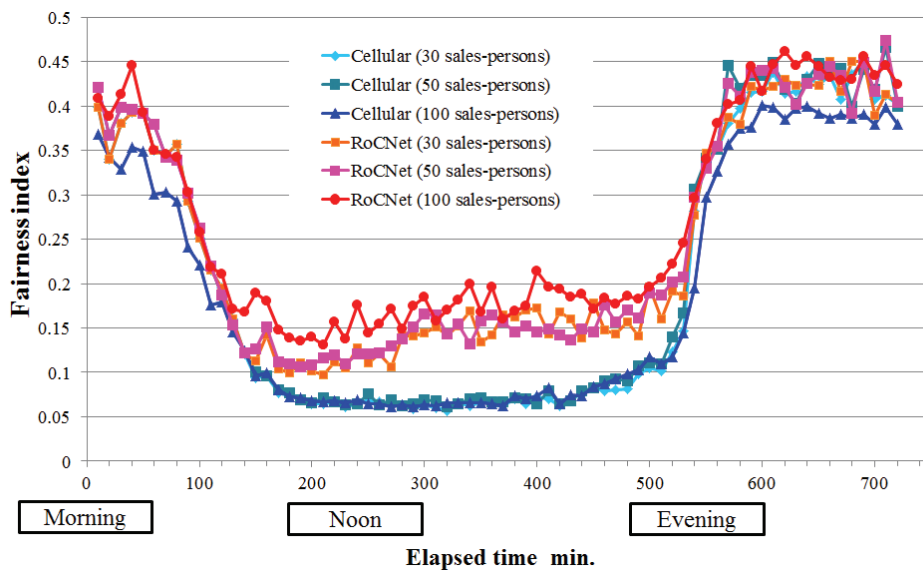


図4-19 各シナリオにおける Fairness Index 値

Figure 4-19: Fairness index of Traffic among BSs in each scenario

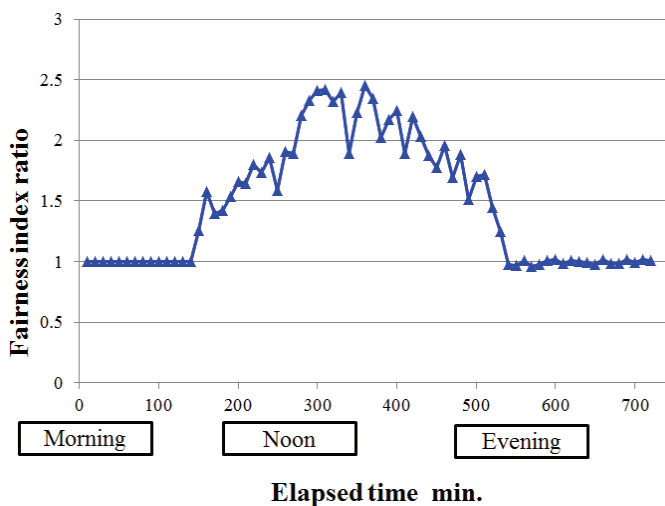


図4-20 Cellular シナリオに対する RoCNet シナリオの Fairness Index 値の比 (外回り社員数 : 50 人)

Figure 4-20: Fairness index ratio of RoCNet scenario to Cellular

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラフィックオフロード

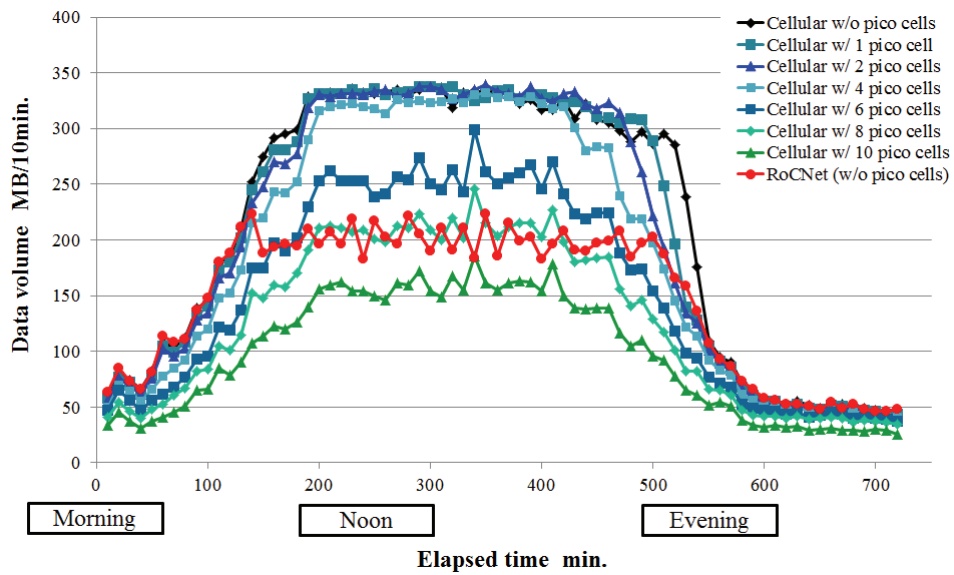


図4-21 オフィス街をカバーする基地局のトラフィック量の推移 (外回り社員数：100人)
 Figure 4-21: Transition of traffic in the BS located in the business district (No. of sales-persons: 100)

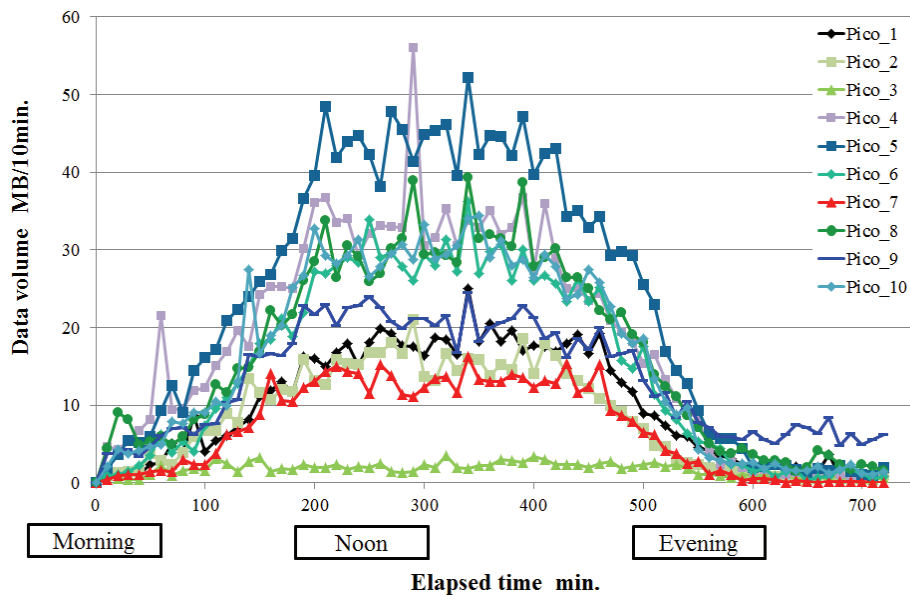


図4-22 ピコセルのトラフィック量の推移 (外回り社員数：100人)
 Figure 4-22: Transition of traffic in the Pico-cells (No. of sales-persons: 100)

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

4.5.3.4 RoCNet 実現時の課題

本節では、RoCNet 実現時の課題等に関し考察する。

4.5.2 にて、高トラヒックエリアにおいて遅延許容可能なデータを生成した移動端末 A が、低負荷エリアへ移動しそうな近隣の移動端末 B へ Bluetooth や無線 LAN 等の近距離無線を用いてデータを送信した後も当該データのコピーを保持する、と記載した。これは、データ転送先である移動端末 B の電源が切れたり圏外へ移動することにより、移動端末 A から移動端末 B へ受け渡しデータが基地局を介して宛先へ配送されなくなった場合に、当該データの欠損を防止すべく、移動端末 A により基地局へ直接データを再送することが必要になるためである。これにあたり、移動端末 A は、移動端末 B へ転送したデータが配送されたか否かを知る必要がある。

この場合、図 4-23 に示すようにプロキシサーバ (RoCNet Proxy と呼ぶ) を設置することが一つの方法となる。動作の一例としては以下のようなになる。移動端末 A からデータを受け渡された移動端末 B が、IP カプセル化して当該データを RoCNet Proxy へ転送する。IP カプセル化されたデータを受信した RoCNet Proxy は、デカプセル化し、当該データの宛先にデータ配送後、データの生成元である移動端末 A に送達確認を送信する。移動端末 A は、送達確認を受信すると、保持していたデータのコピーを破棄する。所定時間以内に送達確認を受信できないと、移動端末 A は基地局へ直接データを再送する。このようなスキームにすることで、RoCNet 利用時に生成データが欠損するリスクを無くすることができる。

また、端末間でデータ転送がなされることから、データのセキュリティは重要な課題である [111]。図 15 のアーキテクチャにおける RoCNet Proxy をミドルボックスとし、例えば生成データを閾値秘密分散法によって分割して [112]、復号に必要な分割情報に満たないデータを周囲の移動端末へ転送し、復号に必要な追加の分割情報をセルラネ

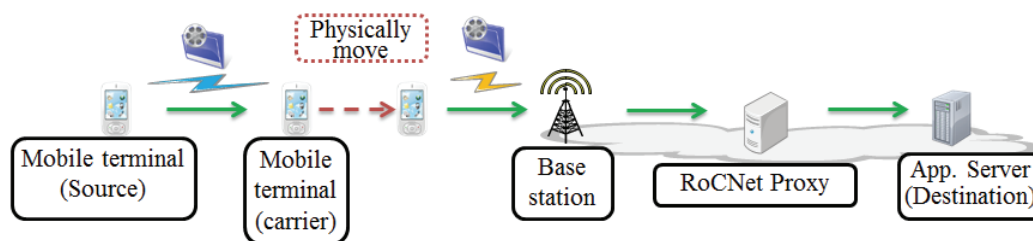


図 4-23 RoCNet アーキテクチャ

Figure 4-23: RoCNet architecture

第4章 蓄積運搬送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

ネットワーク経由で直接 RoCNet メディエータへ送信することで、トラヒックのオフロードとセキュリティの両立が可能になると考えられる。

4.5 まとめ

本章では、遅延が極めて大きい状況や、ネットワークとのリンクが切断しても、ネットワークと非同期で情報伝達を実現できる遅延／切断耐性ネットワークにおいて、ユーザにとって有用な技術であるのに広く普及しない現実に着目し、通信オペレータにメリットのある技術であれば普及に弾みがつくとの仮説を立てた。そこで、通信オペレータの課題である、セルラトラヒックの急増問題を取り上げ、セルラトラヒックの時空間特徴を、実験を通して把握した。続いて、セルラトラヒックの時空間特徴に基づき、遅延／切断耐性ネットワークの技術を活用したセルラトラヒックオフロード手法 RoCNet を提案した。提案手法は、セルラトラヒック負荷の高いエリアから、同負荷の低いエリアへ物理的にトラヒックを分散させる手法である。RoCNet では、パーティクルフィルタを用いて、過去の履歴から、セルラトラヒック負荷の高いエリアから同低いエリアへ移動しそうな端末を推測し、当該端末へデータ運搬をさせることで、オフロード効果を高めた。コンピュータシミュレーションによる評価の結果、RoCNet により、トラヒック負荷の高いエリアにおいて、ピークトラヒック量を 2 割程度、混雑時の平均トラヒック量を 1/3 程度軽減できることが分かり、有効性を確認できた。

第5章 結論

本論文は、ユーザの通信に対する“いつでも・どこでも”というニーズに基づいて進められている、アクセスの無線化、モバイル化において、低コスト化・高効率化を目的とした多様なネットワーク形態が次々に出現している背景を踏まえ、ユーザ視点に基づいた課題を抽出し、課題解決に向けた一連の研究成果をまとめたものである。各章の要点は以下の通りである。

第2章 マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング

無線端末間や中継局間の無線中継を用いることで通信エリア拡張が可能なマルチホップ無線ネットワークでは、基地局からのホップ数の異なるユーザ間でスループットに差異が生じる問題がある。つまり、基地局からのホップ数が大きいユーザは、同小さいユーザに比べて、十分な通信ができない可能性が生じる。この問題に対し、本論文では、ユーザ端末に不向きな複雑な計算処理や、新たなシグナリングメッセージの導入、既存 MAC プロトコルの変更などを必要とせず、ユーザ端末や無線アクセスポイント内のパケットスケジューリング方法のみを変更することによりユーザ間の公平性を大きく改善することの可能なスケジューリング手法を提案した。コンピュータシミュレーションを用いた性能評価により、提案するスケジューリング手法により、ユーザ間のスループットの公平性が最大で 10 倍程度向上することを確認した。

第3章 異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー

複数の異なる無線ネットワークがその特徴を補完しあう異種無線ネットワークにおける、無線システムを切り替えるバーチカルハンドオーバー処理について、必要となるステップを三つと定義し、ステップごとに論じた。最初のステップである「ネットワーク探索」ステップでは、現在接続している無線ネットワーク（例えばセルラ）とは別の、切り替え対象とするネットワーク（例えば無線 LAN）を探索するステップであり、ユーザ端末の消費電力を低く抑えるために、効率的な探索が求められる。そこで、ユーザ端末より各無線システムのカバレッジ情報をサービスエリアマップサーバと呼ぶネットワーク上のサーバに集約し、当該情報を元にユーザ端末の存在する場所に応じた無線システム情報配信を行う提案を行った。また、セルラの電波強度の変動

第5章 結論

を監視することで，ユーザ端末単体で効率的に無線 LAN エリアを探索する手法についても提案した．二つ目のステップである「ネットワーク選択」ステップでは，探索の結果発見したネットワークに接続するか否かを選択するフェーズであり，代表的な手法を紹介した．最後の「ネットワーク切り替え」ステップでは，実際に無線システムを切り替えるフェーズになるが，本論文では，双方向リアルタイムアプリケーションを対象に，サービスが途切れず，かつ接続先無線ネットワークに応じたサービス品質に適応的に切り替わる SIP ベースのシームレスハンドオーバー手法を提案した．提案手法は，ハンドオーバー時に品質の異なる複数のストリームをバイキャストする手法と，ハンドオーバー前後のネットワークの遅延時間差を吸収する手法から構成される．テストベッドによる性能評価の結果，提案手法により，ユーザへ表示されるテレビ電話のデコードフレームの連続性が，ハンドオーバー前後でも保たれ，ユーザ目線でのシームレスなサービス継続が可能であることを示した．

第4章 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード

遅延が極めて大きい状況や，ネットワークとのリンクが切断しても，ネットワークと非同期で情報伝達を実現できる遅延／切断耐性ネットワークに関し，特に震災等大規模災害時に有用な技術であるのに広く普及しない現実に着目し，通信オペレータにメリットのある技術であれば普及に弾みがつくとの仮説を立てた．そこで，通信オペレータの課題である，セルラトラヒックの急増問題を取り上げ，まず，セルラトラヒックの時空間特徴を，実験を通して把握した．続いて，観測したセルラトラヒックの時空間特徴に基づき，遅延／切断耐性ネットワークの技術を活用したセルラトラヒックオフロード手法 **RoCNet** を提案した．提案手法は，セルラトラヒック負荷の高いエリアから，同負荷の低いエリアへ，遅延／切断耐性ネットワークにおける技術を用いて物理的にトラヒックを分散させる手法である．**RoCNet** では，パーティクルフィルタを用いて，過去の履歴からセルラトラヒック負荷の高いエリアから同低いエリアへ移動しそうな端末を推測し，当該端末へデータ運搬をさせることで，オフロード効果を高めた．コンピュータシミュレーションによる評価の結果，**RoCNet** により，トラヒック負荷の高いエリアにおいて，ピークトラヒック量を 2 割程度，混雑時の平均トラヒック量を 1/3 程度軽減できることを確認し，有効性を示した．

第5章 結論

以上で述べたように，本研究では特にユーザ視点に基づいて，三つのネットワーク形態における課題を取り上げ，各課題について解決方法を提案した．社会インフラ化した通信技術では，効率化・低コスト化のみを追求するのではなく，ユーザ視点に基づいた検討を行うことが肝要である．

最後に，今後進められる通信技術に関する研究開発において，本研究の「ユーザ視点」の考え方が幅広く取り入れられることを願って，本論文を締めくくることとしたい．

謝辞

本研究を遂行し、本論文をまとめるにあたって、多くの方のご支援並びにご協力を頂きましたことに対し、ここに感謝の意を表します。

本研究は、筆者が早稲田大学理工学部 電子・情報通信学科 3年にて、甲藤研究室に仮配属されて開始し、修士課程修了後に入社した KDDI 株式会社 (株式会社 KDDI 研究所出向) にて継続して取り組み、さらに社会人博士課程入学後、再度甲藤研究室にて研究を実施した、モバイルネットワークに関する一連の研究成果をまとめたものである。この間、筆者を研究者として育てて下さるとともに、十数年にわたり懇切なご指導・ご鞭撻を賜りました、早稲田大学基幹理工学部教授である甲藤二郎博士に対し、深甚なる感謝の意を表します。また、終始懇切なるご教示を賜った同大学基幹理工学部教授 前原文明博士、並びに同大学大学院国際情報通信研究科教授 中里秀則博士に心より謝意を表します。さらに、同時期に甲藤研究室の社会人博士課程で学び、様々なご助言を頂戴した松尾康孝氏、坂本静生氏、木村純一氏を始め、甲藤研究室の学生各位に対し、深く感謝致します。

株式会社 KDDI 研究所においては、多くが前上司である KDDI 研究所執行役員 杉山敬三博士と連名で行ったものであり、同博士の無線からアプリケーションまで精通した知識に基づく適切なご指導やご助言に対し、厚く御礼を申し上げます。また、本研究を遂行するにあたって、元上司である KDDI 株式会社グループリーダー岸洋司氏からの、本研究の根幹である「ユーザ目線」の重要性や新たな視点に基づく研究開発の進め方のご指導並びに叱咤激励無くしては、本研究の完成は達しえなかつたと感じています。さらに、現上司として、筆者が社会人博士課程で研究する中、状況を理解し、同課程での研究を強力にサポートして下さった KDDI 研究所グループリーダー小野智弘博士に心より感謝致します。また、本研究を遂行する上で適切なご教示、ご助言を賜った、KDDI 研究所研究主査 福原忠行氏、松中隆志氏に深く感謝申し上げます。さらに、直属の上司であつた KDDI 研究所取締役 野本真一博士からは折に触れ懇切丁寧なご助言を賜り、また、研究開発に対する真摯な姿勢を学ばせて頂き、厚く御礼申し上げます。本研究の遂行を温かく見守って頂いた、KDDI 研究所の歴代の所長の各氏、及び現・株式会社 国際電気通信基礎技術研究所社長の平田康夫博士、現・東京大学教授の浅見徹博士、および現 KDDI 研究所会長の安田豊博士、並びに同所長の中島康之博士に感謝いたします。さらには、本研究の共同研究者としてご協力頂いた KDDI 研究所モバイル・ワイヤレス部門の関係諸氏をはじめ、KDDI 株式会社並びに KDDI 研究所の関係各位に対し、厚く御礼申し上げます。

本研究の一部は、筆者がドイツ ブレーメン大 TZI に留学した際に学んだ技術がきっかけとなっているが、留学時代はもちろん、その後も折に触れ最新技術や研究の進め方について有益かつ適切なご教示を賜った、現・NEC Laboratories Europe の Dirk Kutscher 博士に心より御礼申し上げます。

最後に、学士・修士時代より筆者の研究遂行を応援し、常に陰で支えてくれた父母 泉川敏・博子および、社会人との二足の草鞋の中、二年半もの間博士課程における研究遂行並びに論文執筆の重要性を理解し、惜しみない協力をしてくれた妻 陽子に感謝する。

参考文献

- [1] ISC Domain Survey, available at <https://www.isc.org/services/survey/>
- [2] A. Afanasyev, N. Tilley, P. Reiher, and L. Kleinrock, "Host-to-Host Congestion Control for TCP," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 12, Issue 3, May 2010.
- [3] J. Widmer, R. Denda, and M. Mauve, "A survey on TCP-friendly congestion control," IEEE Network, Vol. 15, Issue 3, May 2001.
- [4] Morgan Stanley, "Internet Trends," CM summit, Jun. 2010.
- [5] Y.D. Lin, and Y.C. Hsu, "Multihop cellular: a new architecture for wireless communications," IEEE INFOCOM 2000, Vol. 3, pp.1273-1282, Mar. 2000.
- [6] I.F.Akyildiz, J. Xie, and S. Mohanty, "A survey of mobility management in next-generation all-ip-based wireless systems," IEEE Wireless Communications, Vol. 11, Issue 4, pp.16-28, Aug. 2004.
- [7] E.S. Navarro, and V.W.S. Wong, "Comparison between Vertical Handover Algorithms for Heterogeneous Wireless Networks," IEEE VTC 2006-Spring, pp.947-951, May 2006.
- [8] M. Poikselka, H. Holma, J. Hongisto, J. Kallio, and A. Toskala, "Voice over LTE (VoLTE)," Wiley, Mar. 2012.
- [9] 鶴 正人, 内田真人, 滝根哲哉, 永田 晃, 松田崇弘, 巳波弘佳, 山村新也, "DTN 技術の現状と展望," 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, No.16, pp.57-68, 2011.
- [10] R.C. Carrano, L.C.S. Magalhaes, D.C.M. Saade, and C.V.N. Albuquerque, "IEEE 802.11s Multihop MAC: A Tutorial," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 13, No. 1, First Quarter, 2011.
- [11] OFFICIAL IEEE 802.11 WORKING GROUP PROJECT TIMELINES, available on http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm
- [12] Y. Yuan, "LTE-Advanced Relay Technology and Standardization," Springer, Jul. 2013.
- [13] Y. Park, and F. Adachi, "Enhanced Radio Access Technologies for Next Generation Mobile Communication," Springer, Jun. 2007.
- [14] J. Jun, and M.L. Sichitiu, "Fairness and QoS in Multihop Wireless Networks," IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2003), Oct. 2003.

参考文献

- [15] J. Jun, and M.L. Sichitiu, "The Nominal Capacity of Wireless Mesh Networks," IEEE Wireless Communications, Oct. 2003.
- [16] M.L. Sichitiu, and M. Kihl, "Inter-Vehicle Communication Systems: A Survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 10, No. 2, Second Quarter, 2008.
- [17] H. Izumikawa, K. Sugiyama, and H. Shinonaga, "Scheduling Algorithm for Fairness Improvement among Users in Multihop Wireless Networks," International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2005), Sep. 2005.
- [18] 泉川, 杉山, 松本, "マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング手法," 信学論(B), Vol. J89-B, No.6, pp.897-908, 2006年6月.
- [19] S.S. Kanhere, and H. Sethu, "Fair, Efficient and Scalable Scheduling Without Per-Flow State," IEEE IPCCC 2001, Apr. 2001.
- [20] V. Gambiroza, S. Sadeghi, and E.W. Knightly, "End-to-End Performance and Fairness in Multihop Wireless Backhaul Networks," ACM/IEEE Mobicom 2004, Sep. 2004.
- [21] "The Network Simulator n-2," <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [22] Wu Xiuchao, "Simulate 802.11b Channel within NS2," available online at http://cir.nus.edu.sg/reactivetcp/report/80211ChannelinNS2_new.pdf
- [23] C.E. Perkins, and P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," ACM SIGCOMM '94, Aug. 1994.
- [24] Y. Agarwal, R. Chandra, A. Wolman, P. Bahl, K. Chin, and R. Gupta, "Wireless wakeups revisited: energy management for voip over wi-fi smartphones," ACM MobiSys '07, Jun. 2007.
- [25] NavSync, Ltd. CW20 / 20S GPS Receiver, available on-line at http://www.navsync.com/docs/CW20PBV1_1.pdf
- [26] S.K. Lee and N. Golmie, "Power-Efficient Interface Selection Scheme using Paging of WWAN for WLAN in Heterogeneous Wireless Networks," IEEE International Conference on Communications (ICC) 2006, Jun. 2006.
- [27] M. Inoue, K. Mahmud, H. Murakami, and M. Hasegawa, "Novel Out-of-Band Signaling for Seamless Interworking Between Heterogeneous Networks," IEEE Wireless Communications, Apr. 2004.

参考文献

- [28] M. Ylianttila, J. Makela, and K. Pahlavan, "Analysis of handoff in a location-aware vertical multi-access network," *Computer Networks* 47 (2), Feb. 2005.
- [29] D. Kutscher, and J. Ott, "Service Maps for Heterogeneous Network Environments," *MDM'06*, May 2006.
- [30] IEEE Std 802.21-2008, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks- Part21: Media Independent Handover Services," Jan. 2009.
- [31] 3GPP TS22.278, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Service requirements for the Evolved Packet System (EPS) (Release 10)," ver. 10.1.0. Mar. 2010.
- [32] H. Izumikawa, N. Fuke, K. Sugiyama, and Y. Kishi, "An Efficient Handover Support using Service Area Maps in Heterogeneous Networks," *IEICE Technical Report*, NS2007-45, Jul. 2007.
- [33] H. Izumikawa, and Y. Kishi, "Implementation and Experimental Results of Efficient Handover Support Method using Service Area Map in Heterogeneous Networks," *IEICE Technical Report*, NS2008-41, Jul. 2008.
- [34] "平成 22 年国勢調査に関する地域メッシュ統計," 総務省 統計局, Nov. 2012.
- [35] AirPcap, CACE Technologies, <http://www.cacetech.com/products/airpcap-n.htm>
- [36] H. Wu, Y. Zhang, and Q. Zhang, "Proactive Scan: Fast Handoff with Smart Triggers for 802.11 Wireless LAN," *IEEE INFOCOM 2007*, May 2007.
- [37] "第 5 回情報化社会と青少年に関する意識調査について," 内閣府, Dec. 2007.
- [38] H. Izumikawa, Y. Kishi, and R. Nagareda, "Novel WLAN Coverage Area Estimation Leveraging Transition of Cellular Signal using Multi-mode Mobile Terminal for Heterogeneous Networks," *IEEE WCNC 2009*, pp.1-6, Apr. 2009.
- [39] Y. Min-hua, L. Yu, and Z. Hui-min, "The Mobile IP Handoff between Hybrid Networks," *IEEE PIMRC 2002*, Sep. 2002.
- [40] W. Chen, and Y. Shu, "Active application oriented vertical handoff in next-generation wireless networks," *IEEE WCNC'05*, Mar. 2005.
- [41] 福家, 泉川, 杉山, 岸, "直接/中継接続間ハンドオーバーにおける IEEE 802.21 技術に基づくエンド-エンド QoS 制御手法," *信学技報 NS2007-44*, 2007 年 7 月.

参考文献

- [42] Q. Song and A. Jamalipour, "A Network Selection Mechanism for Next Generation Networks," IEEE ICC'05, May 2005.
- [43] W. Song, W. Zhuang, and Y. Cheng, "Load Balancing for Cellular/WLAN Integrated Networks," IEEE Network, Jan. 2007.
- [44] Q. Song and A. Jamalipour, "A quality of service negotiation-based vertical handoff decision scheme in heterogeneous wireless systems," European Journal of Operational Research, Dec. 2008.
- [45] D. Johnson, C. Perkins, and J. Arkko, "Mobility Support in IPv6," RFC 3775, IETF, Jun. 2004.
- [46] S. Gundavelli, V. Devarapalli, K. Chowdhury, and B. Patil, "Proxy Mobile Ipv6," RFC 5213, IETF, Aug. 2008.
- [47] H. Yokota, S. Gundavelli, and K. Leung, "Inter-Technology Handoff support in Mobile Node for Proxy Mobile IPv6," Internet Draft, IETF, Apr. 2009.
- [48] M. Riegel, and M. Tuexen, "Mobile SCTP," Internet-draft, IETF, Nov. 2007.
- [49] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley, and E. Schooler, "SIP: Session Initiation Protocol," RFC 3261, IETF, Jun. 2002.
- [50] S. Salsano, A. Polidoro, C. Mingardi, S. Niccolini, and L. Veltri, "SIP-based mobility management in next generation networks," IEEE Wireless Communications, Vol. 15, Issue 2, Apr. 2008.
- [51] S. Niccolini, S. Salsano, H. Izumikawa, R. Lillie, L. Veltri, and Y. Kishi, "Requirements for vertical handover of multimedia sessions using SIP," Internet Draft, IETF, Jul. 2008.
- [52] H. Izumikawa, and R. Lillie, "SIP-based Bicasting for Seamless Handover between Heterogeneous Networks," Internet Draft, IETF, Nov. 2007.
- [53] R. Koodli, "Fast handovers for mobile IPv6," RFC 4068, IETF, Jul. 2005.
- [54] H. Izumikawa, I. Yamaguchi, and J. Katto, "An Efficient TCP with Explicit Handover Notification for Mobile Networks," IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2004), Mar. 2004.
- [55] 泉川, 松中, 杉山, "既接続端末への影響を抑制する異種無線ネットワーク間ハンドオーバーの性能向上," 信学技報 IN2006-192, 2007年3月.

参考文献

- [56] 藤川, 兼子, 泉川, 甲藤, “ハンドオーバを考慮した TFRC 通信のための ACK 管理方式,” 信学総大 B-7-62, 2007 年 3 月.
- [57] 泉川, 甲藤, “SGM を用いた Mobile IP におけるシームレスハンドオーバー,” 信学ソ大, B-7-18, 2001 年 9 月.
- [58] H. Matsuoka, T. Yoshimura, and T. Ohya, “A robust method for soft IP handover,” IEEE Internet Computing, Vol. 7, Issue 2, Mar. 2003.
- [59] N. Banerjee, S. K. Das, and A. Acharya, “SIP-based Mobility Architecture for Next Generation Wireless Networks,” IEEE Pervasive Computing and Communications (PerCom '05), Mar. 2005.
- [60] N. Banerjee, A. Acharya, and S. K. Das, “Seamless SIP-Based Mobility for Multimedia Applications,” IEEE Network, Vol.20, Issue2, Mar. 2006.
- [61] M. Handley, V. Jacobson, and C. Perkins, “SDP: Session Description Protocol,” RFC 4566, IETF, Jul. 2006.
- [62] 3GPP TS 23.228: “IP Multimedia Subsystem (IMS); Stage 2 (Release 8,” 3rd Generation Partnership Project, Mar. 2007.
- [63] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, “RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications,” RFC 3550, IETF, Jul. 2003.
- [64] J. Rosenberg, J. Peterson, H. Schulzrinne, and G. Camarillo, “Best Current Practices for Third Party Call Control (3pcc) in the Session Initiation Protocol (SIP),” RFC 3725, Apr. 2004.
- [65] G. Camarillo, E. Burger, H. Schulzrinne, and A. Wijk, “Transcoding Services Invocation in the Session Initiation Protocol (SIP) Using Third Party Call Control (3pcc),” RFC 4117, IETF, Jun. 2005.
- [66] G. Camarillo, J. Holler, and H. Schulzrinne, “Grouping of Media Lines in the Session Description Protocol (SDP),” RFC 3388, IETF, Dec. 2002.
- [67] R. Mahy, and B. Biggs, “The Session Initiation Protocol (SIP) "Replaces" Header,” RFC 3891, IETF, Sep. 2004.
- [68] B. Ramsdell, “S/MIME Version 3 Message Specification,” RFC 2633, IETF, Jun. 1999.
- [69] J. Kangasharju and, K.W. Ross, “Performance evaluation of redirection schemes in content distribution networks,” 5th International Web Caching and Content Delivery Workshop, May 2000.

参考文献

- [70] R. Ramjee, J. Kurose, D. Towsley, and H. Schulzrinne, "Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide-area networks," IEEE INFOCOM'94, Apr. 1994.
- [71] R. Kawada, A. Koike, M. Wada, and S. Matsumoto, "An Efficient Parallel Video Transmission System Including Codecs With Functions of Failure Detection and Coding Noise Evaluation," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 15, No. 11, Nov. 2005.
- [72] K. N. Hamdy, A. H. Tewfik, T. Chen, and S. Takagi, "Time-Scale Modification of Audio Signals with Combined Harmonic and Wavelet Representations," IEEE ICASSP '97, Vol. 1, Apr. 1997.
- [73] Y. Nejime, T. Aritsuka, T. Imamura, T. Ifukube and, J. Matsushima, "A Portable Digital Speech-Rate Converter for Hearing Impairment," IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 4, No. 2, Jun. 1996.
- [74] J. V. D. Meer, D. Mackie, V. Swaminathan, D. Singer and, P. Gentric, "RTP Payload Format for Transport of MPEG-4 Elementary Streams," RFC3640, IETF, Nov. 2003.
- [75] "MPEG Software Development Kit 'MP-Factory'," <http://avs.kddilabs.jp/en/mpeg/mpfs/40/index.html>
- [76] M. Hasegawa, H. Morikawa, M. Inoue, U. Bandara, H. Murakami, and K. Mahmud, "Cross-Device Handover Using the Service Mobility Proxy," WPMC 2003, Oct. 2003.
- [77] K. Fall, "A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets," in Proc. of ACM SIGCOMM 2003, Aug. 2003.
- [78] V. Cerf, et al., "Delay-Tolerant Networking Architecture," IETF, RFC 4838, Apr. 2007.
- [79] F. Warthman, and Associates, "Delay- and Disruption- Tolerant Networks (DTNs)," Interplanetary Internet Special Interest Group, Jul. 2012.
- [80] K. Scott, and S. Burleigh, "Bundle Protocol Specification," IETF, RFC 5050, Nov. 2007.
- [81] H. Haddadi, P. Hui, and I. Brown, "MobiAd: Private and Scalable Mobile Advertising," ACM MobiArch '10, Sep. 2010.
- [82] H. Izumikawa, D. Kutscher, A. Timm-Giel, and C. Bormann, "RACING: Rate Control for Enhancing Intermittent Networking Performance for Mobile Users," IEEE GLOBECOM 2009, pp.1-6, Nov. 2009.
- [83] H. Izumikawa, T. Matsunaka, and Y. Kishi, "Retarding Application Idle Timer Expiration for Service Resumption in Challenged Network," IEEE ISWCS 2011, pp.644-648, Nov. 2011.

参考文献

- [84] Y. Sasaki, and Y. Shibata, “A Disaster Information Sharing Method by the Mobile Servers in Challenged Networks,” WAINA '12, Mar. 2012.
- [85] “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2012-2017,” Cisco systems white paper, May. 2013.
- [86] “The impact of mobile computers and smartphones on CDMA2000 networks,” CDMA Development Group white paper, Jan. 2011.
- [87] “平成 24 年度版 情報通信白書,” 総務省, 2012 年 7 月.
- [88] “LightRadio portfolio: White paper 2 – Economic analysis,” Alcatel Lucent technology white paper, Feb. 2011.
- [89] Available online: <http://android.dtmn.co.jp/app/36493>
- [90] “C-RAN The road towards green RAN,” China mobile research Institute white paper, ver. 2.5, Oct, 2011.
- [91] 小野光洋, 俵 覚, 牧野諭志, “無線エンジニアリング技術,” FUJITSU, Vol. 62, No. 4, 2011 年 7 月
- [92] B. Han, P. Hui, and A. Srinivasan, “Mobile data offloading in metropolitan area networks,” in Proc. ACM Mobicom, Vol. 14, pp.28–30, Sep. 2010.
- [93] B. Han, P. Hui, V.S.A. Kumar, M.V. Marathe, G. Pei, and A. Srinivasan, “Cellular traffic offloading through opportunistic communications: A case study,” in Proc. CHANTS workshop, pp.31–38, Sep. 2010.
- [94] Yong Li, G. Su, P. Hui, D. Jin, L. Su, and L. Zeng, “Multiple mobile data offloading through delay tolerant networks,” in Proc. CHANTS workshop, pp. 43–48, Sep. 2011.
- [95] M.V. Barbera, J. Stefa, A.C.Viana, M.D. Amorim, and M. Boc, “VIP delegation: Enabling VIPs to offload data in wireless social mobile networks,” in Proc. IEEE DCOSS, Jun. 2011.
- [96] A. Balasubramanian, B. Levine, and A. Venkataramani, “DTN routing as a resource allocation problem,” in Proc. ACM SIGCOMM '07, pp. 373-384, Aug. 2007.
- [97] E. Bergfeldt, S. Elelin, and J.M Karlsson, “A performance study of bandwidth measurement tools over mobile connections,” in Proc. IEEE VTC-spring, Apr. 2009.
- [98] 3GPP, TS 22.805, “Feasibility study on user plane congestion management,” Jun. 2012.

参考文献

- [99] S. Maskell and N. Gordon, "A tutorial on particle filters for on-line nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking," *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 50, No. 2, Feb. 2002.
- [100] A. Keranen, J. Ott, and T. Karkkainen, "The ONE simulator for DTN protocol evaluation," in *Proc. SIMUtools*, Feb. 2009.
- [101] 金田茂, 前野誉, 高井峰生, 檜原茂, 山口弘純, 東野輝夫, "DTNを対象としたONEシミュレータとScenargieの機能比較と考察," *信学技報*, vol.113, no.56, MoNA2013-7, pp.107-111, May 2013.
- [102] P. Dillon, "Pittsburgh Working Day Model," available on <http://www.cs.pitt.edu/~pdillon/one>
- [103] F. Ekman, A. Keranen, J. Karvo, and J. Ott, "Working day movement model," in *Proc. MobilityModels workshop*, May 2008.
- [104] I. Popescu, "On a Zipf's law extension to impact factors," *Glottometrics* 6, pp.83-93, 2003.
- [105] H. Liu, C.N. Chuah, H. Zang, and S.G. Motahari, "Evolving landscape of cellular network traffic," in *Proc. IEEE ICCCN'12*, pp.1-7, Jul. 2012.
- [106] M. Sauter, "From GSM to LTE: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband," pp. 183, Wiley, Dec. 2010.
- [107] N. Gupta, "Inside Bluetooth Low Energy," Artech House, pp. 20, Feb. 2013.
- [108] H. Holma, and A. Toskala, "LTE Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced," Wiley, Oct. 2012.
- [109] D. F. Marks and L. Yardley, "Research Methods for Clinical and Health Psychology," SAGE Publications Ltd, Nov. 2003.
- [110] D.M. Chiu, and R. Jain, "Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks," *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 17, pp. 1-14, Jun. 1989.
- [111] S. Farrell, S.F. Symington, H. Weiss, and P. Lovell, "Delay-tolerant networking security overview," IETF Internet Draft, <http://tools.ietf.org/html/draft-irtf-dtnrg-sec-overview-06/>, Sep. 2009.
- [112] J. Kurihara, S. Kiyomoto, K. Fukushima, and T. Tanaka, "A fast (k,L,n)-threshold ramp secret sharing scheme," *IEICE Trans. on Fundamentals*, Vol.E92-A, No.8, pp.1808-1821, Aug. 2009.

参考文献

研究業績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
論文	泉川 晴紀, 甲藤 二郎, “RoCNet: 蓄積運搬転送パラダイムに基づく空間的なセルラトラヒックオフロード,” 信学論(D), Vol.97-D, No.3, Mar. 2014.
論文	<u>Haruki Izumikawa</u> , Tadayuki Fukuhara, Yoji Kishi, Takashi Matsunaka, and Keizo Sugiyama, “User-centric Seamless Handover Scheme for Real-time Applications in Heterogeneous Networks,” IEICE Trans. Commun., Vol. E92-B, No.3, pp.867-877, Mar. 2009.
論文	泉川 晴紀, 杉山 敬三, 松本 修一, “マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング手法,” 信学論(B), Vol. J89-B, No.6, pp.897-908, 2006年6月.
論文	松中 隆志, 泉川 晴紀, 杉山 敬三 “シームレスハンドオーバーにおける安全性を考慮した効率的な認証方式の提案,” 情報処理, Vol. 49, No.1, 2008年1月.
国際会議	<u>Haruki Izumikawa</u> , and Jiro Katto, “RoCNet: Spatial Mobile Data Offload with User-behavior Prediction through Delay Tolerant Networks,” IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2013), pp.2196-2202, Apr. 2013.
国際会議	<u>Haruki Izumikawa</u> , Suphakit Awiphan, and Jiro Katto, “Spatial Uplink Mobile Data Offloading Leveraging Store-carry-forward Paradigm,” The first ACM International Workshop on Practical Issues and Applications in Next Generation Wireless Networks (PINGEN 2012), Aug. 2012.
国際会議	<u>Haruki Izumikawa</u> , Takashi Matsunaka, Yoji Kishi, “Retarding Application Idle Timer Expiration for Service Resumption in Challenged Network,” IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2011), pp.644-648, Nov. 2011.
国際会議	<u>Haruki Izumikawa</u> , Mikko Pitkanen, Joerg Ott, Andreas Timm-Giel, and Carsten Bormann, “Energy-Efficient Adaptive Interface Activation for Delay/Disruption Tolerant Networks,” IEEE International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2010), pp.645-650, Feb. 2010.

研究業績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
国際会議	<u>Haruki Izumikawa</u> , Dirk Kutscher, Andreas Timm-Giel, and Carsten Bormann, “RACING: Rate Control for Enhancing Intermittent Networking Performance for Mobile Users,” IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2009), pp.1-6, Nov. 2009.
国際会議	<u>Haruki Izumikawa</u> , Yoji Kishi, and Riichiro Nagareda, “Novel WLAN Coverage Area Estimation Leveraging Transition of Cellular Signal using Multi-mode Mobile Terminal for Heterogeneous Networks,” IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2009), pp.1-6, Apr. 2009.
国際会議	<u>Haruki Izumikawa</u> , Tadayuki Fukuhara, Takashi Matsunaka, and Keizo Sugiyama, “User-centric Seamless Handover Scheme for Realtime Applications,” IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007), pp.1-5, Sep. 2007.
国際会議	<u>Haruki Izumikawa</u> , Kenji Saito, Naoki Fuke, Tetsuro Ueda, and Keizo Sugiyama, “MAP Multiplexing in IEEE 802.16 Mobile Multi-hop Relay,” IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2006), pp.1-5, Sep. 2006.
国際会議	<u>Haruki Izumikawa</u> , Keizo Sugiyama, and Hideyuki Shinonaga, “Scheduling Algorithm for Fairness Improvement among Users in Multihop Wireless Networks,” International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2005), Sep. 2005.
国際会議	<u>Haruki Izumikawa</u> , Ichiro Yamaguchi, and Jiro Katto, “An Efficient TCP with Explicit Handover Notification for Mobile Networks,” IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2004), pp.647-652, Mar. 2004.
標準化寄書	Saverio Niccolini, Stefano Salsano, <u>Haruki Izumikawa</u> , Ross Lillie, Luca Veltri, and Yoji Kishi, “Requirements for vertical handover of multimedia sessions using SIP,” Internet Draft, IETF, Jul. 2008.
標準化寄書	<u>Haruki Izumikawa</u> , and Ross Lillie, “SIP-based Bicasting for Seamless Handover between Heterogeneous Networks,” Internet Draft, IETF, Feb. 2008.

研究業績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa</u> , Hidenori Konishi, and Jiro Katto, “A Study of Mobile Performance Prediction to Control Wasteful Video Delivery toward GreenICN,” 電子情報通信学会 NS 研究会, NS2013-131, 2013 年 11 月.
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa</u> , and Keizo Sugiyama, “re-GPS: Repositioning with Move-out Estimation in Minimization of Drive Tests,” 電子情報通信学会 MoNA 研究会, MoNA2013-8, 2013 年 5 月.
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa</u> , Ryuichi Yasunaga, Katsuhiro Kujirai, Shigeyuki Terachi, Yoshikazu Shirai, Nao Kobayashi, and Keizo Sugiyama, “QoE-based Log Collection in Minimization of Drive Tests,” 電子情報通信学会 NS 研究会, NS2012-227, 2013 年 3 月.
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa</u> , Suphakit Awiphan, and Jiro Katto, “RoCNet: Robust Cellular Network for Disaster Communication and Traffic Offloading,” 電子情報通信学会 NS 研究会, NS2011-176, 2012 年 1 月.
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa</u> , Takashi Matsunaka, and Yoji Kishi, “Statistical Estimate in Position of Coverage Holes in Minimization of Drive Tests,” 電子情報通信学会 NS 研究会, NS2011-175, 2012 年 1 月.
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa</u> , Shinobu Nanba, and Yoji Kishi, “Efficient Construction of Coverage Map Avoiding Positional Gaps,” 電子情報通信学会 NS 研究会, NS2011-19, 2011 年 5 月.
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa</u> , and Yoji Kishi, “GREEN-CANES: Adaptive Activation Controls of Macro/Femtocell Base Stations for Energy Savings,” 電子情報通信学会 NS 研究会, NS2009-257, 2010 年 3 月.
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa</u> , and Yoji Kishi, “Implementation and Experimental Results of Efficient Handover Support Method using Service Area Map in Heterogeneous Networks,” 電子情報通信学会 NS 研究会, NS2008-41, 2008 年 7 月.
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa</u> , Shigeru Iwasaki, Junichi Kashima, Yoji Kishi, Yuji Sato, and Riichiro Nagareda, “Study of New Mobile Converged Architecture: SIP-based Cellular Network Extension,” 電子情報通信学会 IN 研究会, IN2008-22, 2008 年 6 月.

研究業績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa, Yoji Kishi, and Riichiro Nagareda,</u> “Terminal-driven Coverage Area Detection with Low Power Consumption,” 電子情報通信学会 NS 研究会, NS2007-130, 2008 年 3 月.
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa, Naoki Fuke, Keizo Sugiyama, and Yoji Kishi,</u> “An Efficient Handover Support using Service Area Maps in Heterogeneous Networks,” 電子情報通信学会 NS 研究会, NS2007-45, 2007 年 7 月.
講演 (研究会)	泉川晴紀, 松中隆志, 杉山敬三, “既接続端末への影響を抑制する異種無線ネットワーク間ハンドオーバーの性能向上,” 電子情報通信学会 IN 研究会, IN2006-192, 2007 年 3 月.
講演 (研究会)	泉川晴紀, 齊藤研次, 福家直樹, 植田哲郎, 杉山敬三, “IEEE802.16 中継システムにおける多重 MAP,” 電子情報通信学会 RCS 研究会, RCS2006-116, 2006 年 8 月.
講演 (研究会)	泉川晴紀, 福原忠行, 宇野新太郎, 松中隆志, 蕨野貴之, 杉山敬三, “異種通信システム環境におけるリアルタイムサービスのシームレス通信,” 電子情報通信学会 IN 研究会, IN2006-20, 2006 年 6 月.
講演 (研究会)	泉川晴紀, 石川博康, 杉山敬三, “マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング手法,” 電子情報通信学会 IN 研究会, IN2004-207, 2005 年 3 月.
講演 (研究会)	泉川晴紀, 福家直樹, 杉山敬三, 野原光夫, “1xEV-DO/無線 LAN 中継装置を用いた TCP・PPP セッション保持手法および評価,” 電子情報通信学会 MoMuC 研究会, MoMuC2004-99, 2005 年 1 月.
講演 (研究会)	<u>Haruki Izumikawa, Ichiro Yamaguchi, and Jiro Katto,</u> “An Efficient TCP with Explicit Handover Notification in Wireless Networks,” 電子情報通信学会 IN 研究会, IN2002-208, 2003 年 3 月.
講演 (研究会)	泉川晴紀, 甲藤二郎, “地理的位置情報を用いた分散 LMM,” 電子情報通信学会 IN 研究会, IN2002-110, 2002 年 11 月.

研究業績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
講演 (学会大会)	<u>Haruki Izumikawa, Takashi Matsunaka, and Yoji Kishi,</u> “Clustering Measured Positions in MDT for Detecting Coverage Holes,” 電子情報通信学会 春季全国大会, BS-3-19, 2012 年 3 月
講演 (学会大会)	<u>Haruki Izumikawa, Takashi Matsunaka, and Yoji Kishi</u> “Service Resumption Extending Idle Timeout for Applications in Challenged Network,” 電子情報通信学会 秋季全国大会, BS-6-20, 2011 年 9 月
講演 (学会大会)	<u>Haruki Izumikawa, Shinobu Nanba, and Yoji Kishi,</u> “Efficient Construction of Coverage Map Avoiding Positional Gap,” 電子情報通信学会 春季全国大会, BS-4-29, 2011 年 3 月
講演 (学会大会)	<u>Haruki Izumikawa, and Yoji Kishi,</u> “Gap Absorbing Technique for Challenged Network Scenarios,” 電子情報通信学会 春季全国大会, BS-3-28, 2010 年 3 月
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 岸洋司, “異種無線ネットワークにおけるバーチカルハンドオーバー技術,” 電子情報通信学会 秋季全国大会, BT-3-2, 2009 年 9 月
講演 (学会大会)	<u>Haruki Izumikawa, Dirk Kutscher, and Yoji Kishi,</u> “Green DTN: Delay Tolerance for Energy-Efficient Mobile Communications,” 電子情報通信学会 秋季全国大会, BS-10-29, 2009 年 9 月
講演 (ワークショップ)	<u>Haruki Izumikawa,</u> “Self-Organized Scheduling over IEEE 802.16 Multi-Hop Relay,” Die ITG Fachgruppe 5.2.4 Workshop, Oct. 2009
講演 (学会大会)	<u>Haruki Izumikawa, and Yoji Kishi,</u> “SIP-based Bicastng for Seamless Handover using Third Party Call Control (3pcc),” 電子情報通信学会 春季全国大会, B-7-153, 2008 年 3 月
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 岸洋司, “移動機を用いたサービスエリア情報収集の効率化,” 電子情報通信学会 秋季全国大会, B-6-52, 2007 年 9 月
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 松中隆志, 福家直樹, 杉山敬三, “異種無線ネットワーク環境における HGW を用いた事前認証,” 電子情報通信学会 春季全国大会, B-7-61, 2007 年 3 月
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 松中隆志, 杉山敬三, “異種無線ネットワーク環境における既接続端末を考慮したハンドオーバー,” 電子情報通信学会 秋季全国大会, B-7-77, 2006 年 9 月

研究業績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 齊藤研次, 福家直樹, 植田哲郎, 杉山敬三, “IEEE802.16 中継システムにおける多重 MAP の効果,” 電子情報通信学会 春季全国大会, B-5-140, 2006 年 3 月
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 齊藤研次, 金子尚史, 植田哲郎, 杉山敬三, “IEEE802.16e 中継システム環境下における基地局識別子割り当ておよびハンドオーバー手 法,” 電子情報通信学会 秋季全国大会, B-5-171, 2005 年 9 月
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 石川博康, 杉山敬三, “マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリン グ手法の評価,” 電子情報通信学会 春季全国大会, B-5-231, 2005 年 3 月
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 石川博康, 杉山敬三, “マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジュール手 法,” 電子情報通信学会 秋季全国大会, B-5-183, 2004 年 9 月
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 福原忠行, 石川博康, 杉山敬三, “マルチホップ無線ネットワークにおけるオンデマンドルーティング手法,” 電子情報通信学会 春季全国大会, B-5-130, 2004 年 3 月
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 金子尚史, 福家直樹, 杉山敬三, 篠永英之, “無線 LAN マルチホップによる EV-DO エリア拡大の実装評価,” 電子情報通信学会 秋季全国大会, B-5-196, 2003 年 9 月
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 甲藤二郎, “地理的位置情報を用いた Mobile IP スムースハンドオーバーの評価,” 電子情報通信学会 秋季全国大会, SB-5-4, 2002 年 9 月.
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 甲藤二郎, “地理的位置情報を用いた Mobile IP スムースハンドオーバー,” 電子情報通信学会 春季全国大会, B-6-117, 2002 年 3 月.
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 甲藤二郎, “SGM を用いた Mobile IP におけるシームレスハンドオーバー,” 電子情報通信学会 秋季全国大会, B-7-18, 2001 年 9 月.
講演 (学会大会)	泉川晴紀, 佐藤篤, 甲藤二郎, “高速移動をサポートする Cellular IP 網での近接移動端末間通信における経路最適化方法 の一提案,” 電子情報通信学会 春季全国大会, B-7-59, 2001 年 3 月

研究業績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
特許	<u>Haruki Izumikawa, Kenji Saitou, and Keizo Sugiyama,</u> “Communication scheduling method for wireless relay systems,” US Patent 8,014,325
特許	<u>Haruki Izumikawa, and Tadayuki Fukuhara,</u> “Wireless communication system, relay station device and base station device,” US Patent 7,877,057
特許	<u>Haruki Izumikawa, Kenji Saito, and Keizo Sugiyama,</u> “Methods and apparatus for wireless communications,” US Patent 7,486,928
特許	泉川晴紀, 岸洋司, 濱村洋司, “無線品質情報の有効性を判定する通信装置, 携帯端末, システム, プログラム及び方法,” 特許第 5366262 号
特許	泉川晴紀, “不安定な無線リンクにおける切断耐性を高める無線端末, プロキシサーバ及びプログラム,” 特許第 5339537 号
特許	泉川晴紀, “基地局全体の消費電力を低減する無線通信システム及び基地局起動方法,” 特許第 5339370 号
特許	泉川晴紀, 岸洋司, “呼接続中にアクセス区間を切り替える方法, 構内交換装置, 端末及びプログラム,” 特許第 5205150 号
特許	泉川晴紀, 岸洋司, “呼接続時の端末呼び出し方法, アクセスポイント制御装置, 端末及びプログラム,” 特許第 5184054 号
特許	泉川晴紀, “相互接続可能な複数の無線端末間の経路制御方法, 無線端末及びプログラム,” 特許第 5138538 号
特許	泉川晴紀, “不安定な通信品質の通信リンクを介して移動端末と接続されるプロキシサーバ, プログラム及び代理接続方法,” 特許第 5112249 号

研究業績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
特許	泉川晴紀, 岸洋司, 流田理一郎 “狭域高速無線通信インタフェースを自動的に起動する携帯端末, プログラム及び方法,” 特許第 5020116 号
特許	泉川晴紀, “GPSを用いて狭域高速無線通信インタフェースを自動的に起動する携帯端末, プログラム及び方法,” 特許第 5020022 号
特許	泉川晴紀, 岸洋司, “無線LANの輻輳状態を判定する無線端末, プログラム及び方法,” 特許第 4970219 号
特許	泉川晴紀, 岩崎茂, 鹿嶋潤一, 岸洋司, 酒向勇次, “課金を考慮して局所通信網からセルラ広域通信網へ切り替える再発呼方法, 移動端末及びプログラム,” 特許第 4963687 号
特許	泉川晴紀, 岸洋司, “広域移動通信エリアにおける屋内の通信品質値を収集する携帯端末, プログラム及び方法,” 特許第 4963111 号
特許	泉川晴紀, “アドホックネットワークにおけるパケットを中継制御する無線局及びプログラム,” 特許第 4958284 号
特許	泉川晴紀, 甲藤二郎, 兼子和巳, 藤川知樹, “ハンドオーバーのための移動無線通信用のエッジルータ装置及びプログラム,” 特許第 4943901 号
特許	泉川晴紀, 岩崎茂, 鹿嶋潤一, 岸洋司, 酒向勇次, “移動体通信システムの管理下におけるアクセスネットワーク切替方法, 端末及びプログラム,” 特許第 4911784 号
特許	泉川晴紀, 岸洋司, “通信品質情報に基づくエリアマップを作成するエリアマップ構築システム,” 特許第 4855340 号
特許	泉川晴紀, “符号化画像に優先度を割り当てる映像データ送信装置, プログラム及び方法,” 特許第 4836871 号

研究業績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
特許	泉川晴紀, 松中隆志, 福家直樹, 杉山敬三 “移動端末のハンドオーバにおける認証方法及びシステム,” 特許第 4793826 号
特許	泉川晴紀, 齊藤研次, 杉山敬三, “無線マルチホップネットワークの中継通信方法, 宛先無線局, 中継通信システム及びプログラム,” 特許第 4775902 号
特許	泉川晴紀, 宮地悟史, 加藤晴久, “シームレスハンドオーバにおけるメディアストリーム切替方法, システム及びプログラム,” 特許第 4771369 号
特許	泉川晴紀, 齊藤研次, 杉山敬三, “通信スケジューリング方法,” 特許第 4761365 号
特許	泉川晴紀, 齊藤研次, 杉山敬三, “パケットスケジューリング方法および装置,” 特許第 4688156 号
特許	泉川晴紀, 杉山敬三, “ハンドオーバ方法, ハンドオーバシステム, 基地局, 及びアクセスルータ,” 特許第 4684920 号
特許	泉川晴紀, 福原忠行, 久保健 “移動端末装置及びハンドオーバ方法,” 特許第 4668097 号
特許	泉川晴紀, 蕨野貴之, 福原忠行, 杉山敬三, “通信端末装置,” 特許第 4628798 号
特許	泉川晴紀, 福原忠行, 江口日出彦, “通信中継装置, 無線端末及びコンピュータプログラム,” 特許第 4624274 号
特許	泉川晴紀, 齊藤研次, 杉山敬三, “無線データ通信方法およびシステム,” 特許第 4596534 号

他, 10 件

以 上