

大規模無線 LAN 環境における実時間通信のための ハンドオーバー制御機構に関する研究(継続)

榎 原 茂 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教

1 はじめに

無線 LAN の普及にともない、ユーザが無線 LAN を介していつでもどこでもインターネットに接続できる環境(ユビキタス無線 LAN 環境)になりつつある。このようなユビキタス無線 LAN 環境は、異なる IP サブネットの独立した無線 LAN (たとえば、ホットスポット) が互いにオーバーラップすることで構築される。しかしながら、1 つのアクセスポイント(AP: Access Point)のサービス提供可能な範囲は比較的小さいため、ユーザの移動を考慮すると、ユーザは通信中に異なる IP サブネットの無線 LAN 間を移動(ハンドオーバー)する機会が増加する。特に VoIP(Voice over IP)のようなリアルタイム通信においては、移動中の通信品質を維持することが非常に重要な課題となる。

異なる IP サブネットの無線 LAN 間におけるハンドオーバー時の通信品質を維持するためには、次の 2 つの問題点を考慮する必要がある。

- (1) IP アドレスの変更による通信切断
- (2) 無線環境の変化による通信品質の劣化

(1) を解決するために、これまで MIP(Mobile IP) [1] や mSCTP(mobile Stream Control Transmission Protocol) [2] 等が提案されているが、無線環境の変化による通信品質の劣化を考慮したハンドオーバーは実現されていない。そこで、我々はこれら 2 つの問題点を解決するために、先行研究において、MAC 層の再送回数を用いたハンドオーバー制御機構を提案した [3]。

先行研究では、無線リンクの通信品質の劣化を検知する方法として、MAC 層のデータフレームの再送回数を用いている。これをハンドオーバートリガーとすることで、移動端末(MN: Mobile Node)は無線リンクの通信品質の劣化を迅速かつ適切に検知でき、ハンドオーバー中の通信品質を維持することが可能となる。しかしながら、先行研究では、対象としている無線 LAN は固定の送信データレートであり、移動中の MN における無線リンクの通信品質のみを考慮している。この方式で用いているフレーム再送回数は移動中の無線リンクの通信品質を検知するためには有効ではあるが、実環境のように複数の端末がそれぞれの通信状況に応じて、送信データレートが変化する無線 LAN(マルチレート無線 LAN)環境においては、先行研究で提案したハンドオーバー制御機構では十分な効果を得ることはできない。特に VoIP のような双方向リアルタイム通信の場合、両エンド端末から一定のトラフィックが AP を介して通信が行われるが、無線 LAN では CSMA/CA により AP と端末の送信権は公平に与えられるため、端末数の増加によりアクセスポイント AP がボトルネックとなり、AP のキュー長で発生するパケットロスと遅延が無線 LAN 内全体の通信品質を劣化させる。

そこで、本研究では、先行研究の問題点を明らかにした上で、マルチレート無線 LAN で構築されたユビキタス無線 LAN 環境において、マルチレート機能と端末数の増加による輻輳を考慮したハンドオーバー制御機構を提案する。本研究では、MIP のようにネットワーク中にハンドオーバーをサポートするような機器の導入は必要とせず、エンド端末間のみでシームレスハンドオーバーを実現することを目指す。そのため、ネットワーク中の機器や AP に対しての変更は一切行わない。したがって、本提案方式では、エンド端末のみでシームレスハンドオーバーを実現する。また、本方式の有効性を、シミュレーションを用いて評価する。

2 先行研究の概要と問題点

本節では先行研究 [1] のハンドオーバー制御機構の概要を説明し、複数の端末が存在するマルチレート無線 LAN での先行研究の問題点を示す。先行研究における提案方式では、異なる IP サブネットの無線 LAN 間においてシームレスハンドオーバーを実現するために、マルチホーミング機構とクロスレイヤ機構を用いている。

先行研究では、図 1 に示すように MN は複数の無線 LAN インタフェースを搭載し、通信中の AP との通信が切断される前に、予めもう一つの無線 LAN インタフェースを用いて別の AP と接続する。したがって、MN はハンドオーバー時には 2 つの無線 LAN が使用可能となり、ハンドオーバー処理による通信不能時間を削減することができる。次にハンドオーバー開始及びハンドオーバー先の判断が重要となるが、先行研究では前節でも述べたように、ハンドオーバートリガーとして、MAC レイヤにおけるデータフレームの再送回数を用いている。MAC レイヤにおけるデータフレームの再送はアプリケーションの通信品質が劣化する前に必ず発生するので、アプリケーションの通信品質が低下する前に、無線リンクの品質低下を判断するための指標として使用可能である[4]。具体的には、図 1 に示すように、トランスポート層に実装した Handover Manager (HM) は MAC レイヤから再送回数情報を取得することで、無線リンクの通信品質の劣化を検知することができ、アプリケーションの通信品質が劣化する前にハンドオーバー制御を開始することが可能となる。

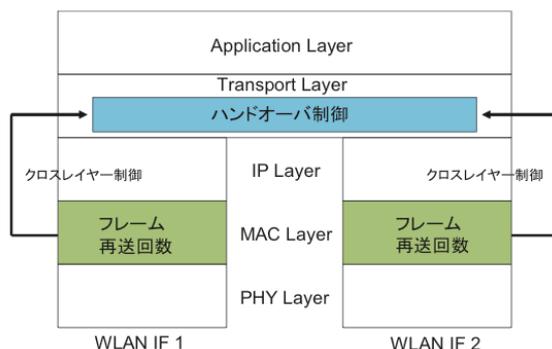


図 1 先行研究におけるハンドオーバー制御機構

以下に、再送回数を用いたハンドオーバー制御機構について簡単に説明する。HM は通信中の無線 LAN インタフェースの MAC レイヤからデータフレームの再送回数を取得し、再送回数が増加していると、使用中の無線 LAN の通信品質が劣化していると判断しハンドオーバーを開始する。しかし、ハンドオーバー先の無線 LAN の通信品質が悪い場合も考えられる。そこで、先行研究では使用する無線 LAN を完全に切り替える前に、2 つの無線 LAN に対して同じパケットを重複して送信(マルチパス転送)することで両方の無線リンクの通信品質を調査した上でハンドオーバー先を決定する。なお、マルチパス転送に対し、片方の無線 LAN のみに対してパケットを送信する状態をシングルパス転送と呼ぶ。

次にマルチパス/シングルパス転送の切替方法について説明する。シングルパス転送中において、データフレームの再送回数が予め設定しておいた閾値(MPT:Multi-Path Threshold)以上となった場合、HM は使用している無線リンクが不安定であると判断し、マルチパス転送に切り替える。マルチパス転送中においては、HM は無線リンクの通信品質の安定度を測定するためのパラメータとして各無線 LAN インタフェースに対して SC(Stability Counter)を用いる。SC はデータフレームの再送回数の値が SCT(Stability Counter Threshold)以下で送信できたとき 1 増加し、SCT より大きい時は 0 にリセットされる。そして、どちらか一方の無線 LAN インタフェースの SC が SPT(Single-Path Transmission)以上となった時、その無線リンクは安定したと判断され、シングルパス転送に切り替える。以上の処理により、MN は移動中の無線リンクの通信品質を判断しながらハンドオーバーを実行する。

しかしながら、上記で述べたハンドオーバー制御機構は、複数の端末が存在するマルチレート無線 LAN 環境における MN の通信品質を維持するには不十分である。以下に、先行研究における問題点を示す。先行研究ではハンドオーバートリガーとしてフレーム再送回数に着目することで、MN の移動時の無線リンクの通信品質の劣化を適切に検知できる。しかし、複数の端末が存在するマルチレート無線 LAN 環境では、VoIP のような双方向リアルタイム通信の場合、端末数の増加により AP のキュー長が増加することでパケットロス及び遅延が発生し、AP から全 MN 宛の通信品質が劣化してしまう。

図 2 に MN の増加による AP のキュー長と MOS (Mean Opinion Score) 値[5]の変化を示す。図 2 は、1 つの無線 LAN (IEEE802.11g) 内にランダムに配置された MN が無線 LAN を介して有線に接続された CN (Corresponding Node) と VoIP (G.711) 通信を行っている環境をシミュレーションした結果である。図 2 より、端末台数の増加に伴い AP のキュー長が増加し、CN から MN への通信の MOS 値が低下していることが分かる。一方、MN から CN への通信の MOS 値は低下していないことが分かる。これは、AP は MN の台数分のトラフィックを処理する

必要があるが、フレーム送信権は他の MN と同じであることが原因である。また、マルチレート無線 LAN 環境では、1つの無線 LAN 内の収容端末台数は MN の送信データレートに依存する。つまり、低データレートの MN が多くなるにつれて、収容台数は減少する。従って、複数の端末が存在するマルチレート無線 LAN 環境においてハンドオーバー時の通信品質を維持するためには、AP のキュー長と送信データレート双方を考慮したハンドオーバー制御機構が必要となる。

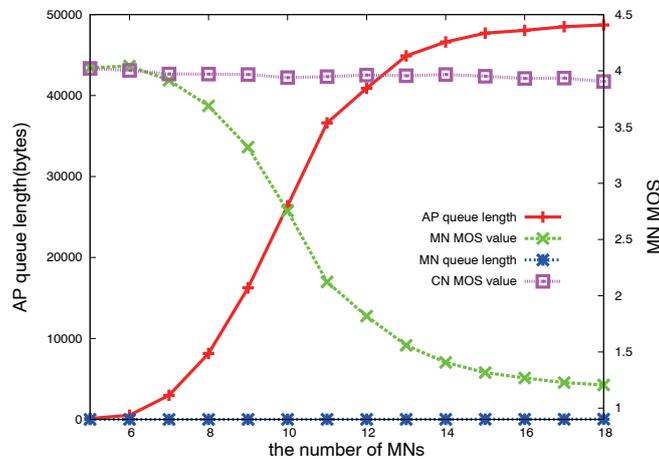


図 2 MN の増加に対する AP のキュー長と MOS 値の変化

3 提案方式

本節では、複数の端末が存在するマルチレート無線 LAN 環境における、ハンドオーバー時の通信品質を維持するためのハンドオーバー制御機構を提案する。

3-1 AP のキュー長の推定

前節でも述べたように、複数の端末が存在する環境においては、AP のキュー長を考慮したハンドオーバーを行う必要がある。しかしながら、現在の IEEE802.11[12] の仕様では AP が MN に AP のキュー長を通知するための機構はない。また、無線 LAN は既に広く普及しているため、新たにキュー長を通知するための機構を追加しても、新たな AP の配置が問題となり、実際には限定的な範囲での使用に限られてしまう。そこで本研究では、既に普及している既存の AP に対して変更を行わず、MN 側から AP のキュー長を推定するアプローチを考える。

AP のキュー長を推定する計測として、パッシブ計測とアクティブ計測がある。パッシブ計測は冗長なトラフィックが増えないため望ましいが、通信中に取得できる情報から AP のキュー長を推定できる情報は現在の規格には存在しない。そこで、アクティブ計測では MN が調査パケットを AP に送信する (AP に対して ping パケットを送信する) ことで、MN-AP 間の RTT (Round Trip Time) を測定し、AP のキュー長を推定する。つまり、AP のキュー長が増加した場合、ping の応答パケットは AP のキューの最後尾に追加されるため、応答パケットよりも前のパケットがすべて処理されるまで AP のバッファで待機することになり、RTT が増加する (図 3 参照)。図 4 に AP のキュー長の変化による MN の MOS 値と MN-AP 間の RTT の関係を示す。図 4 より AP のキュー長の増加に伴い、MN の MOS 値が減少し、MN-AP 間の RTT が増加していることが分かる。従って本研究では、MN-AP 間の RTT を測定することで、AP のキュー長を推定する。

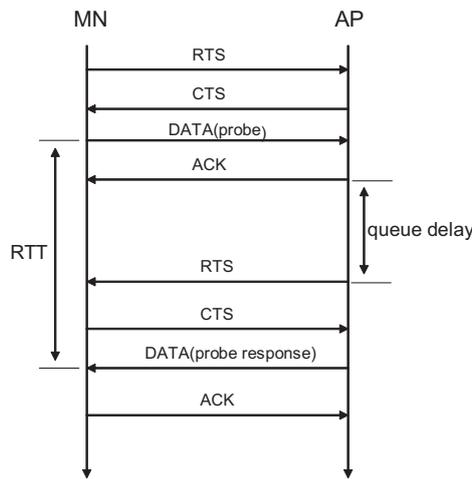


図 3 MN-AP 間の RTT の計測

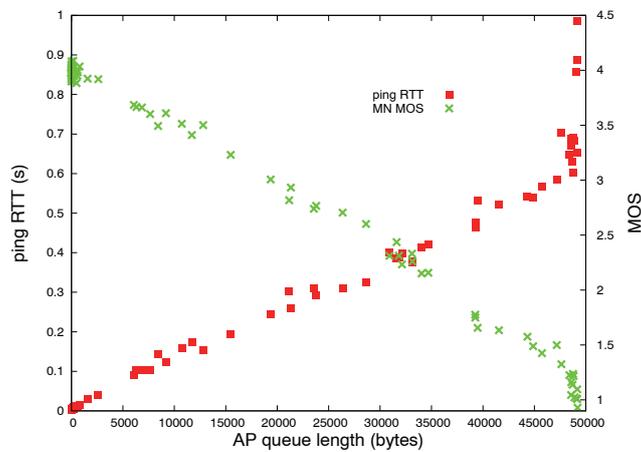


図 4 AP のキュー長の変化に対する MN の MOS 値と RTT の関係

3-2 [提案方式 1] AP のキュー長を考慮したハンドオーバ

本研究では、先行研究と同様に複数の無線 LAN インタフェースを搭載し、シングルパス/マルチパス転送を使い分ける。また、本提案機構で得られたすべての情報は、トランスポート層の HM に集約し、HM がハンドオーバ制御を行う。

シングルパス転送時のアルゴリズムを図 5 に、マルチパス転送時のアルゴリズムを図 6、7 に示す。まず、シングルパス転送時のアルゴリズムについて説明する。MN は 2 つの無線 LAN に接続している場合は、500 ms 毎に各 AP の RTT を測定し、各測定結果 (AP1RTT、AP2RTT) を RTT_thr と比較する。各測定結果が RTT_thr より小さい場合は、AP のキュー長が増加していないと判断し、RTS フレームの再送率による判定を行う。通信中の無線 LAN インタフェースにおける RTS フレームの再送率 (IF_Retry) を 100 ms 毎に取得し、IF_Retry が R_Sthr (=0.6) より大きい場合、マルチパス転送を行う。一方、各測定結果が RTT_thr より大きい場合は、AP のキュー長が増加したと判断し、RTT が小さい AP にマルチパス転送を行わずにシングルパス転送で通信を切り替える。また、両方の測定結果が RTT_thr より大きく、かつ測定結果が同じであった場合、MN が低送信データレートであるため AP のキュー長を増加させている可能性がある。そこで、IF_Rerty と R_Sthr を比較し、無線リンクの通信品質を検知し、できる限り通信品質の良い無線リンクを選択する。

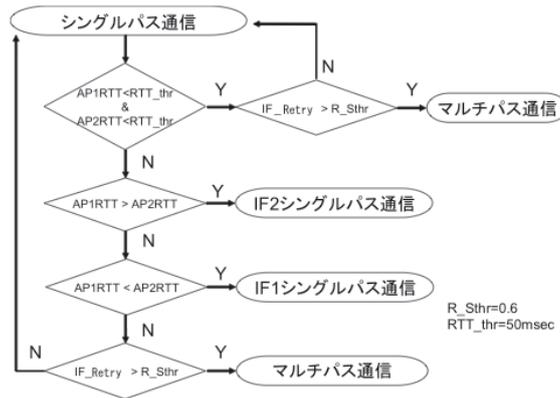


図 5 シングルパス時のアルゴリズム

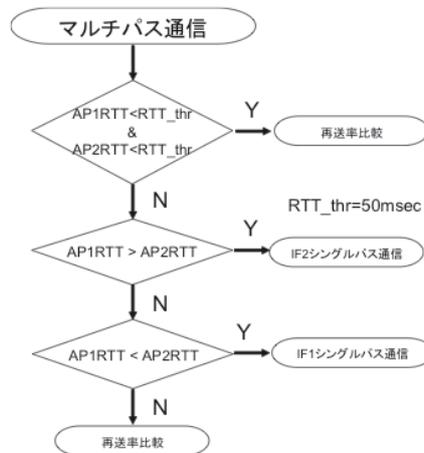


図 6 マルチパス時のアルゴリズム (1)

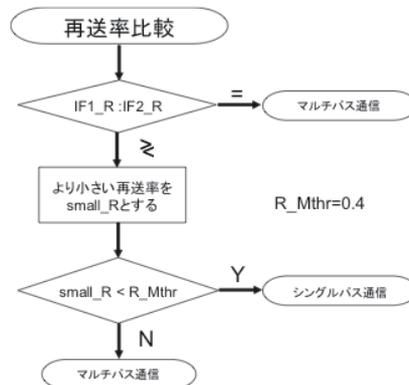


図 7 マルチパス時のアルゴリズム (2)

RTT_thr の値について説明する。図 4 より、MOS 値を携帯電話並の 3.6 以上に維持するための RTT は 200 ms 以下であることが分かる。一方、端末が台数が少ない場合においても、ネットワーク状況によってはキュー長が瞬間的に増加する可能性があるため、閾値を小さく設定しすぎると誤判定を起こしやすくなる。そこで、本研究では RTT_thr の値は 50 ms に設定する。

次にマルチパス転送時のアルゴリズムについて説明する。図 6 に示すように、マルチパス転送時においてもシングルパス転送時と同様に各 RTT を測定し、その結果をもとにハンドオーバー制御を行う。RTT の測定結果で十分に判断できないときは、図 7 に示すようにフレーム再送率を比較し判断する。

3-3 [提案方式 2] オシレーションを考慮したハンドオーバ

提案方式 1 のアルゴリズムをすべての MN に実装した場合、AP のキュー長が増加した際には、すべての MN が一斉にハンドオーバを行ってしまう。その結果、ハンドオーバ先の AP のキュー長が増加し、また一斉にハンドオーバを繰り返す現象(オシレーション)が起こることが予想される。そこで、提案方式 2 では各端末が送信データレートに基づいてハンドオーバを決定することで、オシレーションを予防する。

本研究では IEEE802.11g のマルチレート無線 LAN を対象としているため、フレームは 6、9、12、18、24、36、48、54 Mbps のいずれかで送信される。そこで、キュー長の増加は低送信データレートの影響が大きいため、AP のキュー長が増加したと判断した場合は、まずその大きな要因になっている一番低い送信データレート(6 Mbps)の MN がハンドオーバを行う。そして、一定期間経過後(2 秒後)にも AP のキュー長が増加していると判断した場合は、次に低いデータレート(9 Mbps)の MN がハンドオーバを行う。この制御を再帰的に行うことで、オシレーションの発生を防ぐ。また、この制御は、オシレーションの予防だけでなく、無線 LAN 内の低送信データレートの MN を少なく保つことができ、結果的に AP のキュー長の減少と収容端末台数の増加が期待できる。

3-4 [提案方式 3] 計測パケット数を削減したハンドオーバ

提案方式 1、2 において、すべての MN が RTT を測定すると冗長なトラフィックが増加する。一方、無線 LAN 環境では、1 台の MN が送信したパケットは他の MN でも受信している。そこで、提案方式 3 ではこの特徴を活かし、1 台の MN の計測パケットを他の MN が受信することで冗長パケットを削減しつつ AP のキュー長を推定する。なお、提案方式 3 は提案方式 1 と 2 の制御機構を有している。

実際の処理としては、取得したフレームのプリアンブルと MAC ヘッダより、フレームのサイズと受信時間を取得し、RTT を計測する。まず、受信パケットが調査パケットであるかどうかをフレームサイズから判断する。NAV 期間はデータフレームサイズ、送信データレート、SIFS、ACK フレームの送信時間、DIFS から算出されるため、NAV 期間からデータフレームサイズを計算し、調査パケットであるかどうかを判定することができる。また、送信データレートはプリアンブルから取得し、パケットサイズを計算する。次に、他 MN は調査パケットと AP からの応答パケットを受信し、RTT を測定する。なお、調査パケットを送信する端末は 1 台だけなので、調査パケットを送信する端末を決定する方法は、一定時間(1 秒)RTT の測定が行われなかった場合、低い送信データレートの端末から順に調査パケットを送信する。

4 シミュレーション評価

前節で提案したハンドオーバ制御機構の有効性を示すためにシミュレーションにより評価を行う。シミュレータは Qualnet4.0.1[8]を用いる。シミュレーションでは、ORiNOCO の AP-4000[9]を AP の参照モデルとし、シミュレーションで用いたパラメータを表 1 に示す。本研究では、ハンドオーバ時の VoIP の通信品質を維持することが目的であるため、評価指標として MOS 値を用いる。なお、MOS 値は G.107[6]を利用して R 値から変換し、R 値は参考文献[10]に従い遅延とパケットロスから算出する。

4-1 AP のキュー長を考慮したハンドオーバの評価

AP のキュー長を考慮したハンドオーバ制御(提案方式 1)の有効性を示す。シミュレーションモデルを図 8 に示す。本シミュレーションでは、片方の無線 LAN 内(AP2)に複数の MN を固定配置し、1 台の MN が他の MN が存在しない無線 LAN(AP1)から複数の MN が存在する無線 LAN(AP2)へ移動する際の MOS 値と選択先の AP の選択率を調査する。なお、比較方式としては 2 節で説明した先行研究を用いる。

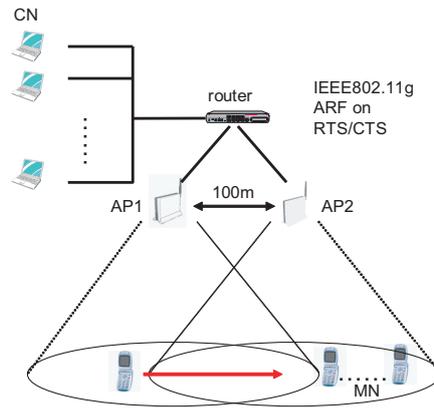


図8 シミュレーションモデル (1)

図9、10にMOS値の変動とAP1の選択率のシミュレーション結果を示す。図9より、提案方式のMNのMOS値は、各APのキュー長を推定することでハンドオーバを適切に制御できているため、比較方式に比べ高いMOS値(3.6以上)を維持できていることが分かる。図10において、AP2の選択率を見ると、提案方式はAP2のキュー長が増加していることを検知した上で、AP2へのハンドオーバを避け、AP1との通信を継続しているが、比較方式はキュー長を推定せず、各APと自分間の通信品質のみをもとにハンドオーバを決定するため、40m付近から徐々にAP2へハンドオーバしていることがわかる。以上の結果から、提案方式は、AP2のキュー長を推定することで、AP1の方が通信品質が良好だと判断し、通信を継続している。

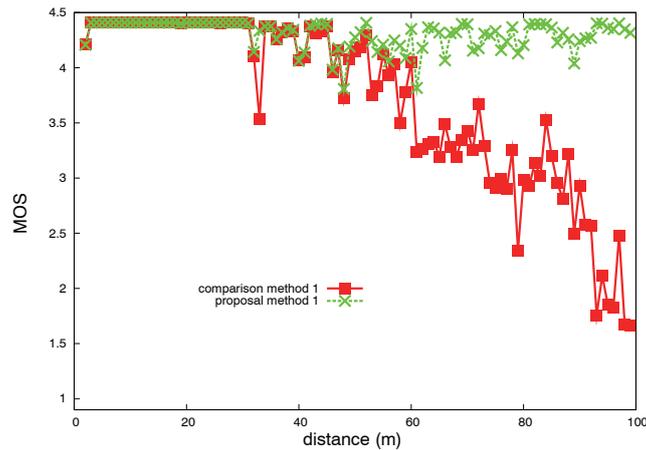


図9 移動するMNのMOS値の変化

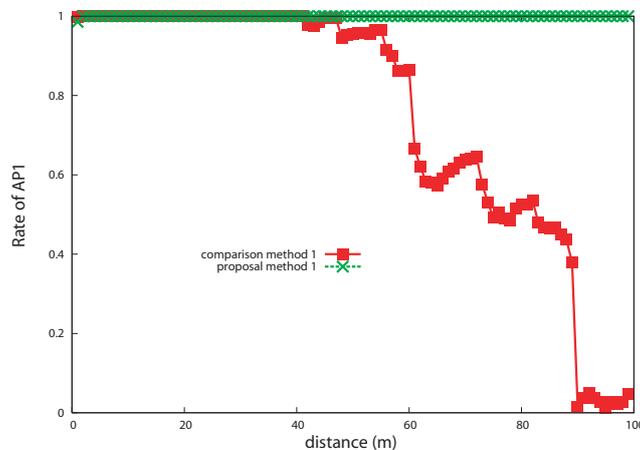


図10 MNのAP1選択率の変化

4-2 オシレーションを考慮したハンドオーバーの評価

図 11 に示すシミュレーションモデルを用いて、提案方式 2 のオシレーションに対する有効性を評価する。図 11 では、AP 間の直線上に MN を等間隔に 20 台固定配置する。なお、すべての MN は 2 つの AP のオーバラップエリアに配置するため、ハンドオーバーが可能であり、シミュレーション開始時はすべての MN は AP1 を介して通信を行う。また比較方式としては提案方式 1 を用いる。

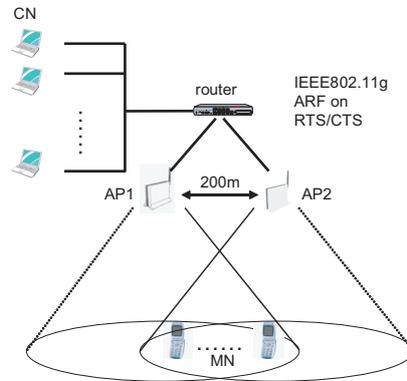


図 11 シミュレーションモデル (2)

図 12 にシミュレーション時間に対する AP1 のキュー長と MOS 値の変化を示す。図 12 から提案方式 1 における AP1 のキュー長は増減を繰り返していることから、オシレーションが発生していることが分かる。一方、提案方式 2 では、シミュレーション開始時に AP1 のキュー長が一瞬増加するが、すぐに収束していることが分かる。MOS 値に関しては、提案方式 1 はオシレーションの発生により、MOS 値が 3.6 以上になるまでに 20 秒ほど要しているが、提案方式 2 では通信開始直後から MOS 値は高い値を維持している。

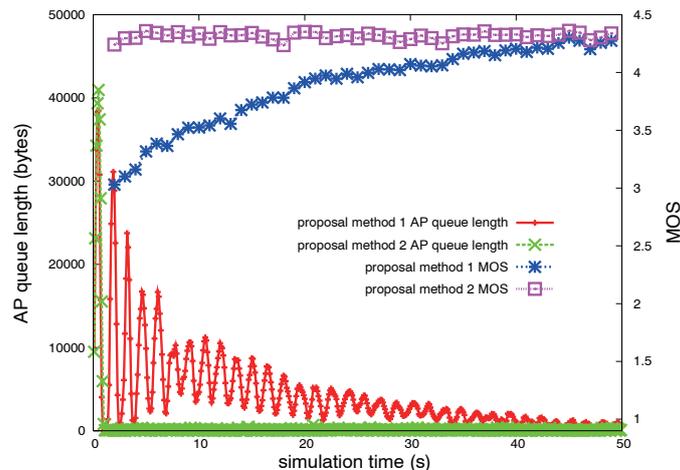


図 12 AP のキュー長と MN の MOS 値の変化

4-3 計測パケット数を削減したハンドオーバーの評価

図 11 に示すシミュレーションモデルを用いて、他端末の計測パケットを受信した際の本提案機構の有効性について評価する。図 11 に示すように、AP 間の直線上に MN を等間隔で固定配置する。配置する MN の台数は 42 台と 48 台の場合の 2 つのシナリオを想定する。これは本シミュレーション環境において、提案方式 2 と 3 においてそれぞれ収容可能な限界の台数である。

図 13 に AP1 のキュー長の変化を、図 14 には MN の MOS 値の変化を示す。図 13 より、提案方式 3 は他端末の計測パケットから RTT を推定するため、提案方式 2 に比べて AP1 のキュー長の増加はかなり小さく抑えられていることが分かる。また、図 14 より、提案方式 3 は AP1 のキュー長の増加を抑えられているため、シミュレーション中、常に MN の MOS 値が維持されていることが分かる。この結果より、他端末の送信した計測パケットから RTT を推定したハンドオーバー制御が有効であることが分かる。

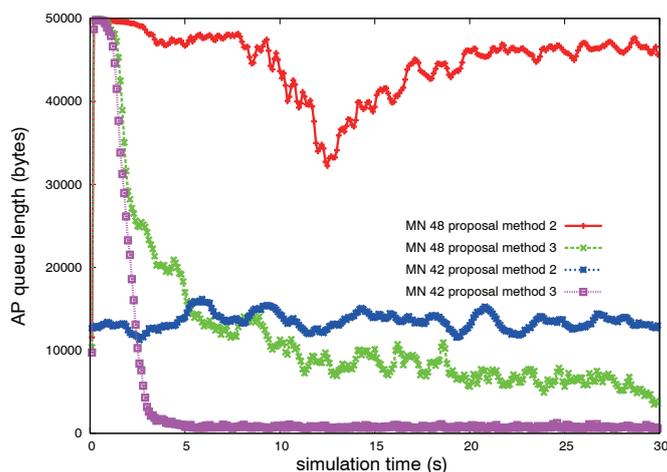


図 13 AP のキュー長の変化

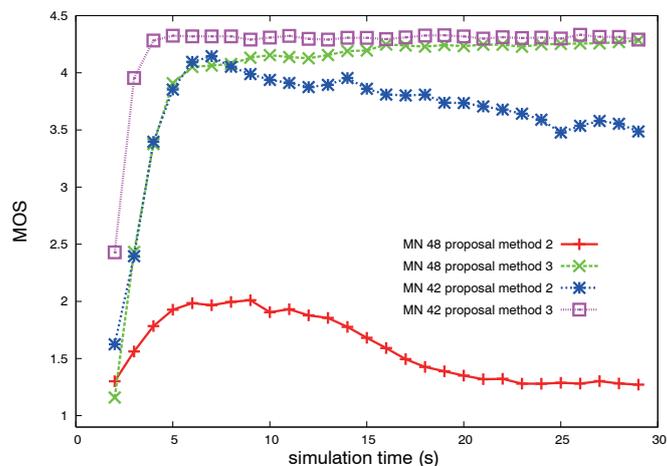


図 14 MN の MOS 値の変化

5 おわりに

本研究では、複数の端末が存在するマルチレート無線 LAN 環境において、ハンドオーバー時の VoIP の通信品質を維持するためのハンドオーバー制御機構の提案を行った。先行研究ではフレーム再送回数によるハンドオーバー制御機構が提案されているが、フレーム再送回数だけでは MN の増加及び送信データレートの変動によって発生する AP のキュー長の増加による通信品質の劣化を検知することはできない。そこで、AP のキュー長の増加を MN 側で推測するために、アクティブ計測を用いて MN-AP 間の RTT を測定することで、端末数の増加による AP のキュー長を推定可能であることを明らかにした。その後、AP のキュー長をもとに、ハンドオーバーを決定する制御機構の提案を行った。しかし、本提案機構は、複数の MN が存在するマルチレート無線 LAN を対象としているため、オシレーションによる影響、及びアクティブ計測による冗長なトラフィックの削減についても考慮する必要がある。そこで、オシレーション問題においては、低送信データレートの MN から順にハンドオーバーを行う手法、一方、冗長なトラフィックに対しては、他 MN の計測パケットから RTT を推測する手法をそれぞれ提案し、シミュレーション結果から、オシレーションと冗長トラフィックを防ぐ事が可能であることを示した。今後の課題としては、今回の研究では VoIP (G. 711) のみが存在する環境を想定しているが、他のトラフィックが混入した際のハンドオーバー制御機構の限界点を示し、その問題点に対応した方式を考案する予定である。

【参考文献】

- [1] C. Perkins (Ed.), "IP Mobility Support for IPv4," IETF RFC3344, Aug. 2002.
- [2] S. J. Koh, et al., "Mobile SCTP for Transport Layer Mobility," draft-reigel-sjkoh-sctp-mobility-04.txt, Internet draft, IETF, Jun. 2004.

- [3] S. Kashihara and Y. Oie: “Handover management based on the number of data frame retransmissions for VoWLANs,” Elsevier Computer Communications, 30, 17, pp. 3257–3269, Nov. 2007.
- [4] K. Tsukamoto et al., “Experimental Evaluation of Decision Criteria for WLAN handover: Signal Strength and Frame Retransmission,” IEICE Transactions on Communications, Vol. E90–B, No. 12, pp. 3579–3590, Dec. 2007.
- [5] ITU-T: “P.800”, <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.800/en>.
- [6] ITU-T: “G.107”, <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.107/en>.
- [7] ITU-T: “G.711”, <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.711/en>.
- [8] Scalable Network Technologies (SNT), <http://www.scalable-networks.com/>
- [9] ORiNOCO: “ORiNOCO AP-4000 Access Point User guide”.
- [10] R. G. Cole and J. H. Rosenbluth, “Voice over ip performance monitoring,” ACM SIGCOMM, pp. 9–24, Apr. 2001.
- [11] 進士昌明: “無線通信の電波伝搬,” 電子情報通信学会(1992).
- [12] IEEE802.11, 1999 Edition, Available at <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-1999.pdf>

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Handover Management for VoWLAN based on Estimation of AP Queue Length and Frame Retries	IEICE Transactions on Information and System, Vol. E92–D, No. 10	2009年10月 (採録決定)
Seamless VoWLAN Handoff Management Based on Estimation of AP Queue Length and Frame Retries,	Proceedings of Fifth IEEE PerCom Workshop on Pervasive Wireless Networking (PWN 2009),	2009年3月