

マルチホップ無線 LAN の提案と実装

大和田泰伯[†] 照井 宏康^{††} 間瀬 憲一[†] 今井 博英^{†††}

An Proposal of Multihop-Wireless LAN and Its Implementation

Yasunori OWADA[†], Hiroyasu TERUI^{††}, Kenichi MASE[†], and Hiroei IMAI^{†††}

あらまし 既存の無線 LAN のバックボーンネットワークとして無線アドホックネットワークを用いるネットワークコンセプトとしてマルチホップ無線 LAN (M-WLAN) が提案されている [3]. M-WLAN は任意の場所に個別に提供されたアクセスポイント (AP) を無線リンクで結び、経路を自動かつ自律分散的に構成するネットワークである。端末には従来の無線 LAN のサービスを提供し、GW となる端末を設置することで、端末は外部ネットワークへも接続可能となる。M-WLAN のアーキテクチャとして IP 中継方式を提案し、その優位性について定性的に評価を行う。更に、その基本機能を実装し、動作確認を行うことで、本方式における実現可能性を示した。また、M-WLAN においての端末間スループット、端末がローミングを行うときの経路切り替え時間についても測定した。この結果、同環境でのアドホックネットワークとほぼ同等の性能が得られ、M-WLAN の有効性を示すとともに、実装に関する問題や今後の課題を示した。

キーワード 無線 LAN, アドホックネットワーク, マルチホップ, インターネット, メッシュネットワーク

1. ま え が き

インターネットの発展と並行して近年、携帯電話に代表される移動通信サービスが急速に発展し、インターネットアクセス手段としても注目を集めている。また、無線 LAN (WLAN) の市場が急速に拡大しており、WLAN を用いたホットスポットサービス等の展開が進展している。WLAN はアクセスポイント (AP) を設置するだけでローカルエリアネットワーク (LAN) の構築が可能であり、複数の AP をケーブルで接続することによりサービスエリアを拡張できる。更に、インターネットへのゲートウェイと AP を接続することにより、常時接続・高速のインターネットアクセスを実現できる。

しかし、これらの技術は有線網からの最後の 1 ホッ

プを無線化する技術であり、今後の無線通信への需要をカバーするだけのインフラの設置には多大な費用や時間が費やされると予想される。

そこで、AP 間のケーブルを無線で置き換え、無線リンクで直接通信できない AP 間では途中の AP を中継点として用いて、複数無線リンクを経由したマルチホップ通信を行うネットワークコンセプトが提案されている [3], [4]。このネットワークコンセプトには、次のような特徴が挙げられる。

- (1) 無線 LAN の AP は互いに有線でワイヤリングする必要はなく、無線マルチホップで通信を行う。
- (2) 自律分散で経路制御を行うため、AP を置くだけでよい。
- (3) 端末へは従来の無線 LAN サービスを提供し、特別な機能を必要としない。
- (4) 拡張性があり、AP を自由に追加できる。
- (5) 端末へインターネット接続サービスを提供できる。

AP は原則として固定した給電可能な場所に設置されるが、移動や移設する場合もあり、AP 間を無線マルチホップで結ぶことにより、より設置や移動・移設に対する自由度が増し、無線 LAN のサービスエリアを容易に拡大できるというメリットがある。一方、AP

[†] 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市
Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 2-8050 Ikarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

^{††} リコーソフトウェア株式会社秋田事業所, 秋田市
Ricoh Software Inc., 3-5-1 Ohmachi, Akita-shi, 010-0921 Japan

^{†††} 新潟大学工学部情報工学科, 新潟市
Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, Niigata University, 2-8050 Ikarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

相互を有線ケーブルで接続する場合に比べて、マルチホップ無線通信に起因するスループット低下が必然的に生ずるが、この点は無線 LAN の高速化や、無線インタフェースの複数化により対応可能である。これは AP のコストアップを招くが、一方でネットワーク事業者にとっては有線ケーブルの配線コストが不要になることによって、設備工事にかかる時間や費用を大幅に削減できる。

このコンセプトは、近年、無線 LAN アクセスネットワークの新たなアーキテクチャとして注目されているメッシュネットワーク [1] の一つの実現形態と位置づけられる。メッシュネットワークの研究も現在盛んに行われており [9]~[13], [15], ネットワーク層で独自プロトコルによりメッシュを構成する製品やサービス提供も開始している [7], [8], [14]。IEEE802.11 のタスクグループ「s」では、データリンク層でメッシュを構成するための機能の標準化を進めている [2]。

我々は、既存の 802.11a/b/g 製品と、IETF で標準化されるルーチングプロトコルを用いて上記コンセプトを実現する、マルチホップ無線 LAN (M-WLAN) に注目する [3], [5], [6], [16]。M-WLAN は、ネットワーク層でメッシュを構成するとともに、メッシュ全体で一つの ESS (Extended Service Set) を構築するものである。

本論文では、M-WLAN のためのアーキテクチャに関して検討を行い、検討したアーキテクチャを実際に組み込みハードウェア上に実装し、性能評価を行うことで、実現可能性や今後の課題を明確にする。

本論文の 2. では M-WLAN の要求条件を整理し、メッシュネットワークにおける位置付けを示すとともに、コンセプト実現のためのシステムを検討する。3. では、M-WLAN のコンセプトを実現する方式として、新たに IP 中継方式を提案し、既存方式と比較して定性的な評価を行う。更に、4. で IP 中継方式の詳細なアーキテクチャを提案し、実装・動作確認、性能評価に基づき実現可能性を示し、今後の課題を明らかにする。5. ではまとめを述べる。

2. マルチホップ無線 LAN (M-WLAN)

2.1 M-WLAN の要求条件

マルチホップ無線 LAN (Multihop Wireless LAN: M-WLAN) は、無線 LAN のバックボーンネットワークをマルチホップ無線ネットワークで構成する (図 1)。M-WLAN を構成するためには、AP に対して以下

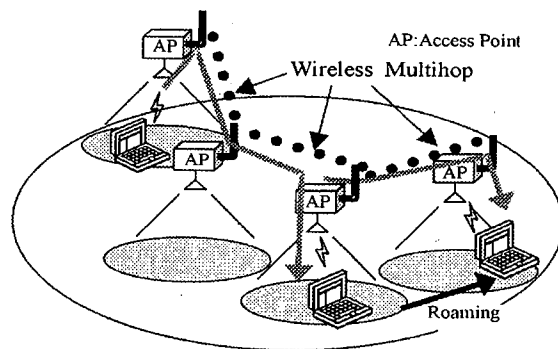


図 1 M-WLAN のイメージ
Fig. 1 An image of M-WLAN.

のような要求条件が存在する。

- (1) AP は相互に隣接 AP を発見し、無線リンクを確立する。直接、通信ができない場合は他の AP を経由するルートを自動的に発見し、通信を可能にする。
- (2) 個々の AP はモバイル端末 (MS) に対して、通常の無線 LAN サービスを提供しなければならない。
- (3) ネットワーク全体が一つの ESS を構成し、MS から見れば全体が一つの LAN セグメントとならなければならない。
- (4) MS は通常の無線 LAN 端末として動作し、バックボーンが無線マルチホップネットワークであることを意識する必要がない。
- (5) AP の一部はインターネットとの接続点に接続し、MS にインターネット接続を提供することも可能である必要がある。この接続点をインターネットゲートウェイ (GW) と呼ぶ。
- (6) 端末にはアドホックネットワークのルーチングプロトコルを動作させる必要がない。

端末への要求条件としては、IEEE802.11 準拠の無線 LAN をサポートしていることだけである。WEP などの暗号化も通常の無線 LAN 同様使用できる。端末からは M-WLAN 全体が一つの LAN セグメントに見えるため、ネットワークレイヤより上位のプロトコルはすべてサポートされる。

これらの要求条件を実現するため、前提条件として以下の仮定をおく。

- (a) AP は他 AP との接続用、ユーザ端末との接続用の 2 種の無線インタフェースをもつ。
- (b) AP をノードとする集合 (GW を含む) は、モバイルアドホックネットワーク (MANET) のルーチングプロトコルを使用する。
- (c) 端末への IP アドレスの割当は DHCP を利

用する。本論文では DHCP サーバは一つの LAN セグメント内には 1 台であるとする。

AP 同士はアドホックネットワークのルーチングプロトコルによって常に経路が維持されており、AP の移動や移設、故障などにも自律的に経路更新を行う。これによって、季節などによる一時的環境変化によるリンクの切断など様々な外的要因にも柔軟に対応でき、強固で柔軟なネットワークを即座に構成できる。無線インタフェースを複数もたせることや、各インタフェースにチャンネルを適切に割り当てることで、伝送帯域を拡大することも可能であるが、以下では簡単のため、アドホックネットワーク側インタフェース・無線 LAN 側インタフェースはそれぞれ一つを前提とする。

2.2 メッシュネットワークと M-WLAN

M-WLAN と非常によく似たアーキテクチャに、メッシュネットワークがある。メッシュネットワークを大別するとルータ型とブリッジ型の二つのタイプが存在する。ルータ型は、端末からのパケットを受け取ると、その IP ヘッダを用いてルーチングを行う方式であり、ブリッジ型は、端末間においてデータリンクレイヤでのコネクティビティを提供する方式である。

ブリッジ型のメッシュネットワークでは IEEE802.11s が挙げられる。IEEE802.11s では 1. で述べたコンセプトと同様のサービスを提供することができる。IEEE802.11s は現在ドラフト段階で、現在標準化へ向けた議論が進められている。また、ブリッジとしてメッシュを構成し、ネットワークレイヤではメッシュ内のすべてが直接つながっているように見える反面、端末が出すブロードキャストフレームはメッシュ内でフラッディングする必要があることや、フラッディングにはピュアフラッディングが使用されること、高信頼のフラッディングが要求されることを考慮すると、メッシュ内のオーバーヘッドは大きいことが予想される。よって、802.11s ではメッシュに参加するノードの最大数に制限をもたせることによってネットワーク全体の品質維持を図っている。

ルータ型のメッシュネットワークの中には、すべての端末にルーチング機能を必要とするタイプ（アドホックネットワーク）と、中継専用装置（メッシュルータ・MR）と端末から構成され、端末にはルーチング機能が不要なタイプの 2 種類が存在する。後者のメッシュネットワークでは、端末の移動により別な MR へ接続を切り換えたときに、IP アドレスの再割当が生ずる。その場合、端末がセッションを維持しながら別の

MR へハンドオーバーするためには、端末側にモバイル IP の機能が必要になる。

M-WLAN では、端末は一度 IP アドレスを割り当てられると、その IP アドレスをもったままメッシュ内を自由に移動でき、端末からはメッシュ全体が一つの LAN を構成するように見える。よって、端末にはルーチングプロトコルや Mobile IP 等の機能は必要ない。その点で M-WLAN はブリッジ型に近いサービスを提供できる。

本論文で検討する M-WLAN の大きな特徴は、IEEE802.11a/b/g に代表されるような既存の無線 LAN を利用して IEEE802.11s 同様に、端末には特別な機能を必要としないブリッジ型のメッシュネットワーク機能をサポートする一方、バックボーンのメッシュネットワークは IP に基づくアドホックネットワークのルーチングプロトコルを用いることによって、フラッディングの効率化やフラッディング発生量の削減を図ることができ、端末の移動が少なく端末からのブロードキャストが多い環境においてはブリッジ型に比べ制御オーバーヘッドを大幅に削減できる方式であるといえる。

2.3 M-WLAN の実現方式

M-WLAN の実現方式としては、LAN Emulation (LANE) 方式 [6]、AP-GW 方式 [20], [21]、Transparent Mobile IP (TMIP) 方式 [21] の三つが既に提案されている。LANE 方式は、端末からのフレームの物理アドレスを用いてあて先 AP を解決し、あて先 AP までフレームをカプセリングして転送する。この場合、ブロードキャストフレームは MANET 内にフラッディングさせなければならない上に、カプセリングによるオーバーヘッドが生じるという問題がある。また、カプセリングに使用する物理アドレスとあて先 AP の対応表を更新するためのオーバーヘッドも生じる。AP-GW 方式は、端末のデフォルトゲートウェイ (GW) を所属している AP に設定させ、端末の経路を AP が維持・更新する方式である。端末への経路を AP 側で維持・更新するために、MANET のルーチングプロトコルを改造する必要がある。この方式では、端末は GW を介した外部ネットワークへの通信は可能であるが、同一ネットワーク内の他 AP へ接続している端末同士の通信は行えない問題がある。このため、メッシュ内にいる端末同士の通信には新たな機能が必要である。TMIP 方式は、MR 切換時の通信セッション維持のために端末に Mobile IP を入れるのではなく、AP 側で Transparent Mobile IP (TMIP) を使う。これによ

表 1 M-WLAN 実現方式の定性的比較
Table 1 Comparison between each M-WLAN architectures.

	Flooding overhead	Data packet encapsulation	Multi-hop path length	MS-MS connectivity
LANE	large	required	short	yes
AP-GW	small	not required	short	no
TMIP	midium	required	long	yes
IP relay	small	not required	short	yes

り, Home AP から Foreign AP に端末が移動したときには Foreign AP が Home AP に対して端末の通信をトンネリングすることで端末は通信セッションを維持したまま AP を移動できる仕組みである。しかし, この方法では Mesh 内の経路が必ず Home AP を経由した冗長な経路になってしまう問題や, トンネリングによるオーバーヘッドが発生する。

本論文で提案する IP 中継方式と既に提案されている方式との比較を表 1 に示す。IP 中継方式は端末間や外部ネットワークへの通信を保証しつつ, LANE 方式に比べフラッディングやトンネリングによる処理負荷・オーバーヘッドを大幅に削減し, また TMIP のようにメッシュ内の経路も冗長にならないメリットがある。IP 中継方式については 3.2 で詳しく述べる。

3. IP 中継方式アーキテクチャ

3.1 前提条件

M-WLAN の基本コンセプトは MS に対して, AP 相互が有線ケーブルで接続された通常の WLAN と同等のサービスを提供することである。M-WLAN における AP を, 以後 Mesh AP (MAP) と呼ぶ。MAP の MANET 側インタフェースを I_m , WLAN 側インタフェースを I_w と呼ぶ。GW として動作する MAP は, I_m と I_w インタフェースの他にインターネット側インタフェース I_i をもつ。M-WLAN の MAP の主要機能を以下に示す。

(1) MAP への IP アドレス自動割当機能

既存の M-WLAN へ MAP が追加される場合, その MAP は自動的に I_m インタフェースの IP アドレスを獲得する。これにはアドホックネットワークにおける IP アドレス自動割当手法を利用することができる [23]~[28]。

(2) 端末への IP アドレス割当

端末への IP アドレス割当は, DHCP により行うことを前提としている。これは, 端末に IP アドレスの割当や, ゲートウェイアドレスの設定, DNS サーバ

の設定作業を行う手間をなくす一方で, 後に述べる端末の物理アドレスから IP アドレスを逆引きするとき不可欠な機能であるためである。

(3) 無線 LAN チャンネル自動割当機能

各 MAP は自エリアに所属する MS に対して WLAN サービスを提供する。このために各 MAP の I_w インタフェースに対して, 無線 LAN のチャンネルを隣接 MAP との相互干渉を最小にするように自律分散かつ自動的にチャンネル割当を行う [29], [30]。また, 一つの MAP において複数の I_m も利用可能であるならば, I_w に割り当てたチャンネルも考慮して, それぞれの I_m に独立したチャンネルを最適に割り当てる必要がある。この割当問題についても, 様々な手法が検討されている [33]~[35]。

(4) ルーチングプロトコル

MAP 間に構成されるマルチホップネットワークでは, MANET 用のルーチングプロトコルを利用する。MANET のルーチングプロトコルには, リアクティブ型とプロアクティブ型があるが [18], 原理的にはどちらでも利用可能である。MS のトラヒックが MAP に集束されるので, MAP 内のトラヒックは比較的大きくなることや, 後述するように各 MAP が所属する MS の IP アドレスのリストを周期的にブロードキャスト転送する場合には, プロアクティブ型のルーチングプロトコルの適合性が高い。以下では, 効率的なフラッディング方式 (MPR フラッディング) をもち, Experimental RFC として標準化されているテーブル駆動型のルーチングプロトコルである OLSR [31] を例として用いる。

3.2 IP 中継方式の機能ブロック

IP 中継方式では, MAP に所属している端末の IP アドレスを MAP が管理し, OLSR が全ての端末への経路を維持, 管理, 更新することにより端末間の通信を可能にしている。IP 中継方式の機能を大きく分けると, 経路作成・更新を行う部分 (経路更新部), パケット中継を行う部分 (IP 中継部), 端末の接続情報

を管理・維持する部分（リンクセンシング部）、物理アドレスから IP アドレスを逆引する部分（アドレス解決部）の四つに分けることができる。

(1) 経路更新部

経路更新部では、OLSR を用いることで MAP 間の経路を維持、管理、更新するのに加え、端末の経路も維持、管理、更新を行う必要がある。この機能は従来の OLSR ではサポートしていない機能である。

(2) IP 中継部

IP 中継部分では、端末の出すフレームから IP パケットを取り出し、MAP のルーティングテーブルに従って転送する。

(3) リンクセンシング部

リンクセンシング部は MAP に所属している端末の情報を監視する部分である。MAP へ新たな端末が所属するとその物理アドレスをアドレス解決部へ通知する。

(4) アドレス解決部

リンクセンシング部より通知された物理アドレスから IP アドレスを解決し、経路更新部へ通知を行う。

3.3 端末の IP アドレス所得と広告

経路更新部の OLSR には、自身へ所属している端末の経路を維持・更新するために、自身へ所属している IP アドレスを他 MAP へ広告するための拡張を行う。端末が MAP にアソシエーションすると、リンクセンシング部が自分に所属した端末の物理アドレスを検知し、アドレス解決部へ通知して IP アドレスを得る。これについては 3.5 で詳しく述べる。

アドレス解決部が自分に所属した端末の IP アドレスを解決すると、OLSR に通知する。OLSR は自分の MAP へ所属している端末の通知を受けると、端末の所属テーブル（アソシエーションセット）を更新する。アソシエーションセットには、すべての端末の IP アドレスと、その所属 MAP の IP アドレスが記されている。経路更新部は、アソシエーションセットに基づき自身の経路表を再計算するとともに、自分に所属している端末の IP アドレスのリストを独自のメッセージ（Associated Address Decralation : AAD）に載せて直ちに広告する。このメッセージは OLSR によって MPR フラッディングされる。AAD を受け取った他の MAP の経路更新部は、重複チェックを行った後、メッセージの生成元アドレスとリストに記載されているアドレスをもとにアソシエーションセットを更新し経路表の再計算を行う。

その後の端末と MAP 間のリンク状態は、AP のドライバ情報から取得し、監視する。その結果、まだ自身への接続を維持していると判断された端末の IP アドレスは、OLSR の AAD メッセージにより定期的に広告される。これはアソシエーションセット更新時の AAD メッセージが衝突などで受け取れなかった場合に対応するためである。もし、ドライバから端末のリンク切断が通知されれば、リンクの切断された端末の経路エントリはアソシエーションセットから削除され、変更後の端末の IP アドレスリストを AAD メッセージにて直ちに広告する。

3.4 IP 中継部における処理 (図 2)

MAP は、AP として動作するインタフェース (I_w) をプロミスキャスモードで動作させ、端末が出すフレームを IP 中継部がすべて受信する。IP 中継部は、受け取ったフレームの TYPE フィールドをチェックし、IP パケットならばそのフレームの MAC ヘッダを取り除き IP パケットを自身のプロトコルスタックの IP (incomming) へ積み上げる。スタックへ詰まれた IP パケットは、そのまま MAP 内のルーティングテーブルに従いあて先端末が所属している MAP へと転送され、そこから端末へと転送される仕組みである。フレームの TYPE が ARP や RARP など、IP 以外のフレームであれば、別の処理を行う。ARP に関しては 3.5 で詳しく言及する。

3.5 IP アドレスの解決

端末への IP アドレスの割当は DHCP により行う。MAP ではあらかじめ DHCP リレーエージェントが動作しており、DHCP のサーバの IP アドレスは MAP ごとにあらかじめ設定されているものとする。MAP は端末からの DHCP パケットを受け取るとそのパケットを DHCP サーバあてにリレーする。DHCP サーバは IP アドレスの割当メッセージを DHCP リクエスト

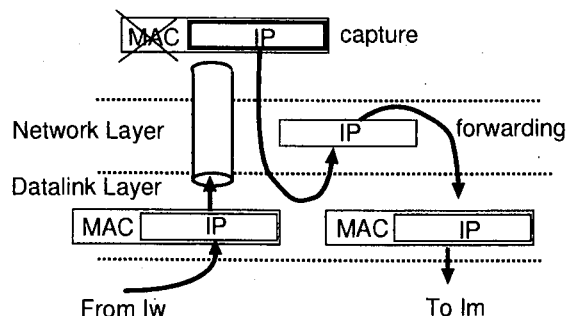


図 2 MAP 内でのフレーム処理
Fig. 2 The frame treatment of the MAP.

ト送信元の MAP へと返す。MAP はそれを受け取ると、そのメッセージ内から MS の物理アドレスと、その MS へ割り当てられた IP アドレスのペアをアソシエーションセットに保持し、アソシエーションセット内の自分へ所属している端末の IP アドレスのリストを AAD メッセージを用いて広告する。それと同時に、端末へ DHCP (ACK) パケットを転送し、MS へ IP アドレスを割り当てる。

一度 IP アドレスを割り当てられた端末が別の MAP へと移動した場合には、端末の通信セッションを維持するためにも端末に割り当てた IP アドレスの変更は行わずに、以前割り当てられた IP アドレスを使用し続ける。このとき MAP は、新規に所属してきた端末の物理アドレスを無線 LAN ドライバ情報から得ることができるが、端末の IP アドレスは知ることができない。MAP のアドレス解決部は、自エリアへ所属してきた端末の物理アドレスから IP アドレスを解決するため、次の 2 方式を考える。

(1) DHCP 問合せ方式

DHCP サーバは、一度端末へ IP アドレスを割り当てると、その端末の情報をサーバ内に保持する。このとき、端末の識別子として Client Identifier (CID) が利用される。これを用いて、同一端末からもう一度割当要求があると、以前割り当てた IP アドレスと同一の IP アドレスを再度割り当てる。この仕組みを利用し、一度 IP アドレスを割り当てられた端末が別の MAP へ移動してきた際に、MAP は端末のアソシエーションを検知すると、端末の物理アドレスを CID とした DHCP Discover パケットを代理で DHCP サーバへ転送する。DHCP サーバは端末から再度 IP アドレス割当要求がきたと判断し、前回割り当てた IP アドレスを含む DHCP Offer パケットを MAP に対して返送する。この DHCP Offer パケットより MAP は移動してきた端末の IP アドレスを即座に知ることができる。

MAP の IP 中継部が端末から受け取ったフレームが ARP メッセージだった場合には、そのメッセージの内容から問合せを行う端末の IP アドレスを調べる。もし、その IP アドレスがアソシエーションセット内に存在すれば、端末が所属している MAP へ UDP で ARP フレームをカプセル化し、送信する。あて先 MAP はそのパケットを受け取るとカプセルを外し ARP フレームをそのまま MASTER 側インタフェース (I_w) から送信する。ARP リクエスト, ARP リプ

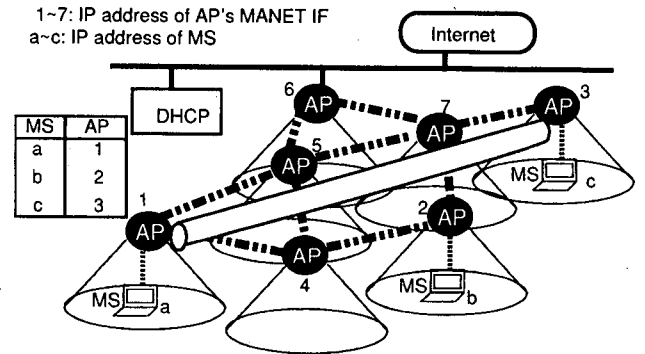


図 3 ARP におけるトンネリングメカニズム
Fig. 3 The ARP message tunneling mechanism.

ライとともにこのように UDP のトンネルを利用して行われるので、端末は目的端末の物理アドレスを解決できる (図 3)。

ARP を正確に端末間で行うことによって端末は自身の ARP キャッシュ内に通信相手の物理アドレスを正確に記録しておく。これにより、通信相手が別の MAP から自身が所属している MAP へとローミングしてきたときに、同一 MAP 内で AP のブリッジ機能を利用して通信が行える。

(2) MAC アドレス分配方式

この方式は、MAP に対して新規に接続してきた端末から DHCP サーバへ端末が IP アドレスを問い合わせたときに、DHCP サーバから IP 端末に送られる DHCP ACK パケットを MAP でキャプチャし、そこから端末の物理アドレスと IP アドレスのペアを取得する。その後、端末の物理アドレスと IP アドレスのセットを AAD メッセージにのせて MAP 全体へフラディングする。これにより、M-WLAN'内にいるすべての端末の IP アドレスと物理アドレスのセットをすべての MAP が知っていることになる。これにより端末が移動してきた際には、MAP は自分もっている端末の IP アドレスと物理アドレスの対応表から即座に端末の IP アドレスを調べることができるメリットがある。端末が ARP リクエストを出した場合には、MAP が代理で端末が出す ARP リプライと同様の ARP リプライを返すことができる。よって、ARP のトンネリングをするオーバーヘッドが削減できる。

3.6 DHCP 問合せ方式と MAC アドレス分配方式の比較

DHCP 問合せ方式と MAC アドレス分配方式の比較を表 2 に示す。M-WLAN の制御メッセージのトラヒックは、端末数、AAD の広告周期、端末の移動

表 2 DHCP 問合せ方式と MAC アドレス分配方式の定性的比較

Table 2 Comparison between DHCP query and MAC address distribution methods.

	DHCP query	MAC-IP share
DHCP client requirement	Client -ID option	none
Control packet size	small	large
Handoff delay	large	small
ARP tunneling	required	not required

度に依存する。一例として、AAD メッセージ周期を 5 秒、MAP 数を 5 台、端末数を MAP1 台当り 10 台とし、MAP が直線上に並んでおり、それぞれが隣の MAP としか通信できない環境で、端末の移動がないと仮定すると HELLO, TC [31], AAD を合わせた制御メッセージトラフィックが占める帯域は、DHCP 問合せ方式では 2.59 kbit/s, MAC アドレス分配方式では 3.15 kbit/s となり、MAC アドレス分配方式の方が約 20%強ほど制御メッセージが増えることになる。端末数が増加すると MAC アドレス分配方式の制御トラフィックがより増加する傾向をもつ。これは、MAC アドレス分配方式では AAD メッセージに端末の物理アドレスを含めることによる。しかし、DHCP 問合せ方式では ARP のトンネリングによるオーバーヘッドが生ずることや、端末がハンドオフするたびに DHCP サーバに対して DHCP Discover による IP アドレス問合せが発生するため、端末のハンドオフが頻繁に起こる環境では制御オーバーヘッドが増える可能性がある。この方式のもう一つの問題点は、DHCP のオプションである Client Identifire (CID) を用いることである。Windows や Mac OS 等ほとんどの OS の DHCP クライアントはこれをサポートしているため、問題なくこの方式が動作するが、CID オプションをもたない DHCP クライアントの実装も中には存在する。その場合、サーバ側でクライアントを一意に識別することができず、DHCP Discover に対して常に新しい IP アドレスを返してしまうため、正常に動作しない。この点では、MAC アドレス分配方式ではこのような問題は発生しない。また、端末のハンドオフ時にも瞬時にアドレス解決もでき、ARP のトンネリングも必要ないため、MAC アドレス分配方式の方がハンドオフの高速化を期待できる。

定期的に送信する AAD メッセージの送信インタバル

を長くすることで、AAD メッセージによる MANET 内トラフィックをある程度緩和できると考えられる。しかし、AAD メッセージの周期を長くすると、更新された AAD メッセージが衝突などで受け取れなかった場合、次の AAD を受け取るまで経路を正しく更新できないため、経路不整合の時間が長くなる。よって AAD メッセージの広告周期は適切に設定する必要がある。

4. マルチホップ無線 LAN の部分試作と評価

4.1 実 装

M-WLAN の IP 中継方式を実装した。端末の物理アドレスから IP アドレスを解決する方法は今回提案している二つの方法をそれぞれ実装し、動作確認・性能評価を行った。M-WLAN の MAP には、小型な組込み用ハードウェアである OpenBlockS266 [36] を用い、OS には SSD Linux (Kernel2.4.32) を使用した。また、今回の実験では、カーネルパラメータ `/proc/sys/net/ipv4/route/min_delay` の値を変更している。これは、カーネルの経路テーブルに変更が生じてから実際にパケットが変更後の経路でフォワーディングされるまでにかかる遅延時間を定めるパラメータである。デフォルトの 2 の値では AAD メッセージを受け取って経路変更を行ってから実際にその経路でパケットがフォワーディングされるまでに 2 秒以上かかるが、経路切替の高速化を図るため 0 に変更した。無線 LAN カードには、MAP 用インタフェース (I_w) としてコンパクトフラッシュタイプの WLI-CF-L11 (Prism2)、MANET 用インタフェース (I_m) として PCMCIA タイプの WLI-PCM-L11GP (Hermes) を使用した。MAP の AP 用のソフトウェアには `hostapd` を用い、インタフェース I_w のドライバは `hostap_cs` を用いて Master モードで動作させる。 I_m はドライバとして `orinoco_cs` を用い、Ad hoc モードで動作させる。

今回実装したプログラムは大きく四つに分類できる。一つは経路更新部として独自の拡張を加えた OLSR、更に、IP 中継部として IP の中継を行うプログラムである。OLSR は、UniK-OLSR 0.4.9 [37] をもとに独自の拡張を行った。IP 中継にはリアルタイム性が必要なため、OLSR とは独立したプロセスとして実装し、OLSR とアソシエーションテーブルを互いに同期をとりながら更新するよう実装を行った。また、リンクセンシング部としては、端末がアソシエーションを行う

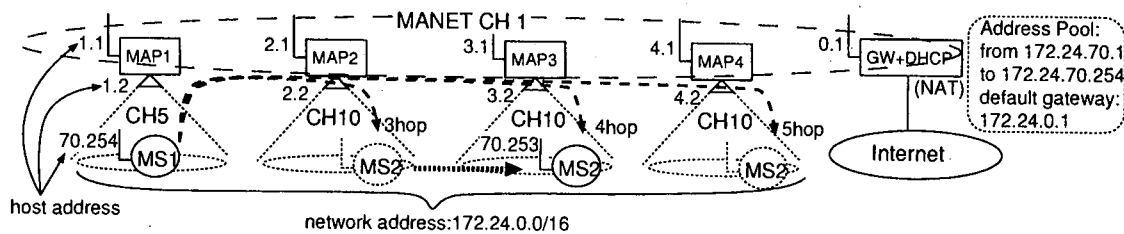


図4 ネットワーク構成の一例
Fig. 4 An example of the network structure.

とすぐに検知するように、`hostapd`にも独自の拡張を加えている。また、IPアドレスを逆引してOLSRへ通知するためのアドレス解決部はIP中継部と同一プロセス内に実装した。

4.2 動作確認・性能評価

4.2.1 動作確認

実装したM-WLANの動作を確認するため、4台のMAPと1台のGW、2台の端末を用い動作実験、性能評価を行った。それぞれのノードは10m四方の部屋内の机の上に、それぞれ数センチ間隔で1列に並べ固定配置した。すべてのノードが相互に電波が届く範囲にあるため、`iptables`を用いて特定のリンクを切ることによって隣接ノード間だけにリンクを構成し、図4に示すような一直線型のマルチホップ環境を構築した。また、無線LANのRTS/CTSは使用しない設定にした。

本来はMAPの I_w に設定するESSIDはM-WLAN全体で共通のものを使用するが、MSがSSIDを変更するだけで、接続APを容易に切り換えられるように、MAPごとに別のESSIDを設定した。このネットワーク環境において、DHCP問合せ方式とMACアドレス分配方式のそれぞれを動作させ、それぞれの環境において端末同士でping, ssh, ftp, http等のプロトコルが正常に行えることを確認した。また、GWを介したインターネット上のPCに対しても、上述のプロトコルが正常に動作することを確認した。

4.2.2 スループット・応答遅延時間の評価

今回実装したM-WLANを介して、端末同士のTCP・UDPのスループットと応答遅延時間を測定した。TCPに関しては最大Windowサイズは65535、最大Windowシフトサイズは14で測定を行った。測定は4.2.1で用いた環境と同一の環境で行い、MS1とMS2間のスループットと応答遅延時間(Round Trip Time: RTT)を、図4に示すようにMS2の所属するMAPを変えることでホップ数を変化させながら測

定した。スループットの測定にはnetperf [32]を用い、パケットサイズはMTU (1500 Byte)で測定を行った。アドホックネットワーク側インタフェース I_m の無線LANビットレートは11 Mbit/sに固定した。今回の実装では、マスターモードに設定したインタフェース I_w の無線LANビットレートを固定することができなかったため、Autoレートに設定した。これにより、APに接続したクライアントとAP間の無線LANビットレートは、電波状況により自動的に選択されてしまう。そのため、クライアントとAP間のリンクが安定して11 Mbit/sのビットレートを得られる場所を探してノードを配置・固定し、その環境において端末間で10回スループット測定を行い、その平均値を求めた。

比較のために、端末とMAPの無線インタフェースすべてをアドホックモードで動作させ、無線LANビットレートをすべて11 Mbit/sに固定し、端末を含むすべてのノードでOLSRを動作させて構築したアドホックネットワーク環境でも、同様にTCP・UDPスループットとRTTの測定を行った。測定結果を図5に示す。

UDPのスループットはそれぞれのリンクでは6 Mbit/s程度のスループットが出ることは確認しているが、3ホップでのスループットはアドホックネットワークの場合でも5 Mbit/sにとどまっている。これは、二つのMAPを経由するときMAPの二つのインタフェース間で行われる転送中継時のキューあふれによるパケット損が発生しているためと考えられる。また、M-WLANのUDPスループットは、DHCP問合せ方式とMACアドレス分配方式ともにアドホックネットワークの場合より若干低い値になっている。M-WLANではMAPがすべてのフレームを無差別受信し、1フレームごとに、IPかどうかのチェック、自MAP内の端末あてIPかどうかのチェック、MACヘッダの除去とIP中継転送の処理を行っているため、

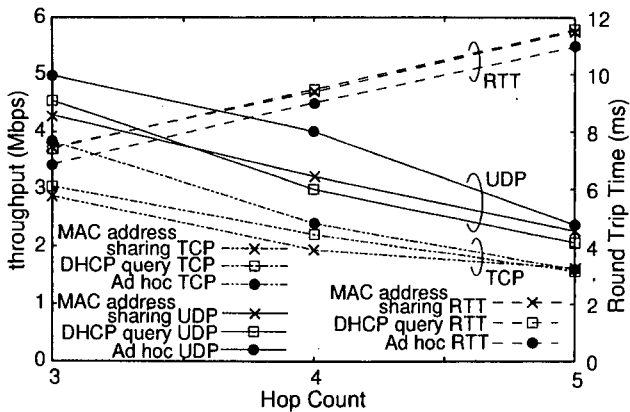


図5 TCP/UDP スループットと往復遅延時間
Fig.5 TCP/UDP throughput and round trip time.

アドホックネットワークのように単純な kernel のフォワーディング処理と比較すると 1 パケットごとの処理負荷が増える。これは、M-WLAN の方がアドホックネットワークの場合に比べ、RTT が 0.6 ms 程度多くなっていることからうかがえる。M-WLAN ではこの内部処理の遅延に伴い、MAP 内部のキューあふれがアドホックネットワークの場合に比べ多く発生しているため、スループットが低下していると考えられる。しかし、3 ホップの場合で 4 Mbit/s を超えるパフォーマンスを得ることができた。また、5 ホップではアドホックネットワークとの差が減少している。これは、マルチホップによりリンク当りの実効帯域が減少し、スループットが低下したため、処理負荷が減少したことによると考えられる。

TCP スループットに関しても、3 ホップではアドホックネットワークの方が若干高いスループットを示しているが、ホップ数が増えるにつれ、差がなくなっている。これは、UDP の場合と同様にマルチホップ通信により 1 リンク当りの実効帯域減少、TCP の Window 制御により、スループットが低下し、処理負荷が低減されたためと考えられる。

4.2.3 ハンドオーバー時の通信途絶時間

先述のスループット・RTT 測定と同様の図 4 の環境において、MS2 が MS1 に対して ping を 10 ミリ秒間隔で行いながら、MS2 を MAP3 へとハンドオーバーさせ、MS1 と MS2 間の通信途絶時間を測定した。このとき、GW のインタフェース (I_m) において ethereal を動作させ、MANET でやり取りされるすべてのパケットをキャプチャすることで、ハンドオーバー時の経路切替に要する時間の詳細を記録する。DHCP 問合せ方式と MAC アドレス分配方式のそれぞれにおいて上

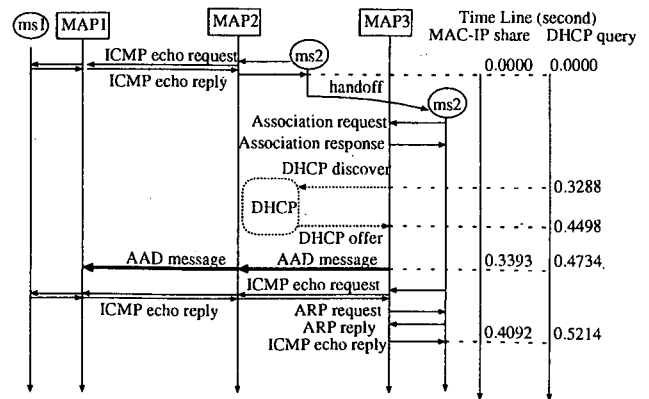


図6 通信途絶時間の詳細
Fig.6 The detail of the disconnected term.

述の実験を 5 回行い、通信途絶時間 (MAP 切替前の最後の ping が届いてから、MAP 切替後最初の ping が届くまで) の平均時間を図 6 に示す。

MS2 が MAP3 にハンドオフするのに用いる時間は、両方式とも到大差はなく、平均で約 300 ms 程度であった。この後、MAP3 は MS2 のアソシエーションを検知すると、端末の物理アドレスから IP アドレスを解決し AAD メッセージを送信する。この際、DHCP 問合せ方式の方が MAC アドレス分配方式に比べ DHCP サーバに対する IP アドレス問合せが発生するため、AAD メッセージを送信するまでに遅延が生じる。今回の実験環境では MAP3 から DHCP サーバへ直接通信できるエリアにいるために、DHCP offer が返ってくるまでの遅延は 100 ms 程度になっているが、DHCP サーバへのホップ数や、DHCP サーバの実装によっては、DHCP offer パケットが返ってくるまでの遅延が増加することも予想される。

5. むすび

次世代情報通信ネットワークの構築・運用に関する新しいネットワークコンセプトとして、マルチホップ無線 LAN (M-WLAN) に注目し、M-WLAN のアーキテクチャに関して検討を行った。M-WLAN の具体的なアーキテクチャ、プロトコルとして新たに IP 中継方式を示すとともに、提案方式と既存方式との定性的な評価を行った。また、IP 中継方式における具体的な実装として DHCP 問合せ方式、MAC アドレス分配方式をそれぞれ IPv4 で実装し、その実装での実験システムにおいて動作の検証を行い、M-WLAN の実現可能性を示した。更に、その実験システムにおけるスループット、応答遅延時間を測定し、両方式ともに

アドホックネットワークで同様の環境を構築したときの性能には若干劣るが、ほぼ同等の性能が得られることを確認した。ローミング時の切り替え時間についても IPv4 にて評価を行った。これにより、本実装において平均 500 ms 程度の端末間通信途絶時間で端末のハンドオーバーが実現できることが確認できた。

今後、M-WLAN を用いてサービスを提供していくためには、まだ多くの課題が残されている。例えば、M-WLAN 用アクセスポイントの MANET 側インタフェースへの IP アドレスの自動割当問題、各アクセスポイントとそのカバーエリアのモバイル端末との通信に用いるチャネルの自動割当問題、MAP 追加時におけるチャネルの再割当問題、インターネット接続のためのゲートウェイが複数存在する場合のゲートウェイ選択などの問題である。また、マルチホップ通信に伴い発生する隠れ端末問題によるパケット損の最小化も問題である。提案したアーキテクチャの、より詳細かつ定量的な評価、より効率的な M-WLAN 用アクセスポイントの仕様確認と開発も必要である。また、本論文では取り上げていないが、M-WLAN においてセキュリティ維持や設備の乱用防止を行うためのポリシー・技術についても重要な検討課題である。今後、これらの機能を検討・開発し、本方式の実現可能性を総合検証する必要がある。

文 献

- [1] I.F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, "Wireless mesh networks: A survey," *Comput. Netw.*, vol.47, no.4, pp.445-487, 2005.
- [2] <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>
- [3] K. Mase, M. Sengoku, and S. Shinoda, "A novel networking concept for supporting next-generation computing—The voluntary network," *IFCS2002*, pp.S3-18-S3-22, March 2002.
- [4] M. Katayama, K. Mizuno, M. Nakayama, and M. Shimizu, "A multi-protocol wireless multi-hop network employing a new efficient hybrid routing scheme," *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) 2003 Spring*, vol.3, pp.2013-2017, April 2003.
- [5] 間瀬憲一, "ボラントリーネットワークと無線マルチホップ LAN (MWLAN)," *信学技報*, CQ2002-1, 2002.
- [6] K. Mase, N. Karasawa, M. Kusumi, K. Nakano, and M. Sengoku, "Wireless LAN with wireless multihop backbone network (WMLAN)," *IEEE International Conference on Wireless LANs and Home Networks (ICWLHN'01)*, pp.349-358, 2001.
- [7] Firetide Networks. <http://www.firetide.com>
- [8] Kiyon Autonomous Networks. <http://www.kiyon.com>
- [9] D.A. Maltz, J. Broch, and D.B. Jonson, "Lessons from a full-scale multihop wireless ad hoc network testbed," *IEEE Pers. Commun.*, vol.8, no.2, pp.8-15, 2001.
- [10] D. Aguayo, J. Bicket, S. Biswas, D.S.J. De Couto, and R. Morris, "Link-level measurements from an 802.11b mesh network," *ACM Annual Conference of the Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)*, pp.121-131, Aug. 2004.
- [11] A. Raniwala, K. Gopalan, and T. Chiueh, "Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks," *ACM Mobile Computing and Communications Review*, vol.8, no.2, pp.50-65, 2003.
- [12] UCSD Mesh Networks Testbed. <http://www.calit2.net>
- [13] BWN lab wireless mesh networks research project. <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/mesh/>
- [14] <http://www.tropos.com/technology/whitepaper.shtml>
- [15] <http://research.microsoft.com/mesh/>
- [16] 大和田泰伯, 間瀬憲一, "無線マルチホップ LAN の通信方式の検討とスループット評価," *信学技報*, CQ2002-81, 2002.
- [17] <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [18] 間瀬憲一, 中野敬介, 仙石正和, 篠田庄司, "アドホックネットワーク," *信学誌*, vol.84, no.2, pp.127-134, 2001.
- [19] H. Gharavi and K. Ban, "Multihop sensor network design for wide-band communications," *Proc. IEEE*, vol.91, no.8, pp.1221-1234, Aug. 2003.
- [20] 大和田泰伯, 照井宏康, 間瀬憲一, "マルチホップ無線 LAN の部分試作と評価," *信学ソ大*, B-21-8, Nov. 2005.
- [21] V. Navda, A. Kashyap, and S.R. Das, "Design and evaluation of iMesh: an infrastructure-mode wireless mesh network," *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks 2005 (WoWMoM2005)*, pp.164-170, June 2005.
- [22] L. Lamont, M. Wang, L. Villasenor, T. Randhawa, R. Hardy, and P. McConnel, "An IPv6 and OLSR based architecture for integrating WLANs & MANETs to the Internet," *International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'02)*, pp.816-820, Oct. 2002.
- [23] C.E. Perkins, J.T. Malinen, R. Wakikawa, E.M. Belding-Royer, and Y. Sun, "IP address autoconfiguration for ad hoc networks," *draft-ietf-manet-autoconf-01.txt*, Nov. 2001. (work in progress)
- [24] M. Mohsin and R. Prakash, "IP address assignment in a mobile ad hoc network," *MILCOM 2002*, vol.2, pp.856-861, 2002.
- [25] S. Nesargi and R. Prakash, "MANETconf: Configuration of hosts in a mobile ad hoc network," *INFOCOM2002*, June 2002.
- [26] H. Zhou, L.M. Ni, and M.W. Mutka, "Prophet address allocation for large scale MANETs," *Proc.*

IEEE INFOCOM2003, vol.2, pp.1304-1331, March 2003.

- [27] K. Mase, S. Narita, and S. Yoshida, "Efficient IP address assignment in mobile ad hoc network," WPMC'03, vol.2, pp.106-110, Oct. 2003.
- [28] K. Mase and C. Ajih, "No overhead autoconfiguration for OLSR (NOA-OLSR)," draft-mase-autoconf-noalsr-00.txt, 2005.
- [29] A. Hills, "Large-scale wireless LAN design," IEEE Commun. Mag., vol.39, no.11, pp.98-104, 2001.
- [30] 五十嵐亮, 間瀬憲一, "WMLAN におけるチャネル割当てアルゴリズムに関する検討," 信学技報, CQ2002-5, 2002.
- [31] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol," IETF RFC3626, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>, Oct. 2003.
- [32] <http://www.netperf.org/netperf/NetperfPage.html>
- [33] A. Raniwala and T. Chiueh, "Architecture and algorithms for an IEEE802.11-based multi-channel wireless mesh network," INFOCOM2005.
- [34] P. Kyasanur and N.H. Vaidya, "Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless network," WCNC2005, vol.10, no.1, pp.31-43, Jan. 2005.
- [35] Y. Shimizu, F. Nuno, M. Nakayama, and M. Umehira, "Distributed channel allocation algorithm reducing hidden terminal problem for wireless ad-hoc networks," 電子情報通信学会第2回アドホックネットワークワークショップ, B13-B16, May 2003.
- [36] <http://www.plathome.co.jp/products/openblocks/openblocks266/>
- [37] <http://www.olsr.org/download/>
(平成 18 年 2 月 10 日受付, 5 月 19 日再受付)



間瀬 憲一 (正員:フェロー)

昭 45 早大・理工・電気通信卒。昭 47 同大大学院修士課程了。同年電電公社武蔵野電気通信研究所入所。以来、通信網構成法、ダイナミックルーティング、ネットワーク設計法、通信品質、コンピュータネットワーク、マルチホップ無線ネットワーク等の研究に従事。昭 53~54 米国コロンビア大客員研究員。平 11~15 新潟大学工学部情報工学科教授。平 16 より新潟大学大学院自然科学研究科教授、国際情報通信教育研究センター長。工博。平 5 年度本学会論文賞受賞。平 9 年度第 13 回電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。著書「マルチメディアネットワークとコミュニケーション品質」、「無線 LAN とユビキタスネットワーク」など。



今井 博英 (正員)

平 5 新潟大・工・情報工卒。平 7 同大大学院修士課程了。平 10 同大学院博士課程了。工博。現在、同大学工学部情報工学科助手。ネットワークシステムの性能評価、共有仮想環境の研究に従事。



大和田泰伯 (学生員)

平 14 新潟大・工・福祉人間工卒。平 16 同大大学院修士課程了。同年、同大学院・自然科学研究科入学現在、在学中。平 15 第 65 回本学会学術奨励賞受賞。平 15 VTC2003-spring Student Encourage Award 受賞。平 17 VTC2005-fall Student Paper Award 受賞。



照井 宏康

平 16 新潟大・工・情報工卒。平 18 同大大学院修士課程了。同年、リコーソフトウェア株式会社秋田事業所ソリューショングループ所属。