

# mesh STA の移動特性を考慮した 自律無線メッシュネットワーク構成法

植田 和憲<sup>1,a)</sup> 岩田 誠<sup>1</sup> 馬場 健一<sup>2</sup> 下條 真司<sup>3</sup>

受付日 2019年5月8日, 採録日 2019年11月7日

**概要:** IoT デバイスを活用可能な領域を拡げるには, それらを柔軟に接続可能な無線メッシュネットワーク技術が有効な手段の1つである. 無線メッシュネットワークでは, アクセスポイント (mesh STA) どうしをマルチホップ無線通信によって接続する. 通信が混雑した状況では, mesh STA 間での経路制御情報の交換自体が, データパケット配送を妨げる確率が高い. さらに, 移動頻度の低い mesh STA が配送経路に属する確率が一般に高いため, それらの配下のノードによる通信の品質向上が, ネットワーク全体の品質向上に寄与する. 本稿では, 経路制御情報を最小化する観点から, 各 mesh STA が隣接 mesh STA から周期的に送信されるビーコンによる情報交換のみで自らの位置情報を規定できるネットワークを構築し, その位置情報のみによって自律的に経路制御を行う手法を提案する. さらに, シミュレーションによる性能評価を通して, 移動頻度の低い mesh STA 配下のノードの送受信性能として, 高パケット転送率のメディアストリームの本数が既存手法である HWMP より約 65% 優位であることを示す.

**キーワード:** 無線メッシュネットワーク, マルチホップ通信, mesh STA, 移動特性, ネットワーク構成法

## Wireless Mesh Network Construction Based on Moving Characteristics of Mesh STAs

KAZUNORI UEDA<sup>1,a)</sup> MAKOTO IWATA<sup>1</sup> KEN-ICHI BABA<sup>2</sup> SHINJI SHIMOJO<sup>3</sup>

Received: May 8, 2019, Accepted: November 7, 2019

**Abstract:** To deploy the IoT devices widely, wireless mesh network flexibly accommodating them is one of promising techniques. In this network, access points called mesh STAs are connected with each other via wireless links. In the congesting situation, network resource to transfer the data packets might often sacrifice for exchanging information on routing control among mesh STAs. In addition, infrequently moving mesh STAs are often involved in ordinal routing path so that performance of nodes under that STAs should be prioritized for total network performance improvement. This paper proposes a novel wireless mesh network based on moving characteristics of mesh STAs. In this network, mesh STAs exchange information using periodic beacons only among their neighbor STAs to construct an autonomous mesh network. Simulation results showed the number of media-streams with higher packet transfer ratio on infrequently moving STAs could be improved about 65% compared with existing HWMP network.

**Keywords:** wireless mesh network, multi-hop communication, mesh STA, moving characteristics, network construction method

<sup>1</sup> 高知工科大学情報学群  
Kochi University of Technology, Kami, Kochi 782-8502,  
Japan

<sup>2</sup> 工学院大学情報学部情報通信工学科  
Kogakuin University, Shinjuku, Tokyo 163-8677, Japan

<sup>3</sup> 大阪大学サイバーメディアセンター  
Osaka University, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

a) ueda.kazunori@kochi-tech.ac.jp

## 1. はじめに

IoT アプリケーションの利用拡大により, IoT デバイスを電源や有線ネットワークがない環境で用いる機会や機器の数が増えている. それらの機器を接続するアクセスネットワークとして携帯電話網を用いると高いコストを要する.

それらのアクセスネットワークとして、アクセスポイントどうしを無線通信によって接続する無線メッシュネットワーク技術を用いることが考えられている [1], [2], [3], [4].

無線メッシュネットワークは、mesh STA と呼ばれる相互接続機能を有するアクセスポイントによって構成される。無線メッシュネットワークでは、mesh STA 間のマルチホップ通信を行うため、経路制御が必要である。各 mesh STA は経路制御に用いる情報をネットワーク上で交換する。この情報交換も無線通信で行われるため、そのための通信に起因する衝突などによってデータパケット配送の機会を奪う可能性がある。

また、実アプリケーションによっては、mesh STA それぞれの移動特性が異なる。具体的には、移動頻度が低く長時間同じ位置にとどまる mesh STA や、移動頻度が高い mesh STA などがある。移動頻度の高い mesh STA に対する経路制御のためには情報交換の時間間隔を縮めることなどが必要であるが、この対策は移動頻度の低い mesh STA に対しては過剰である。一方で、移動特性に合わせた調整を行うと経路制御や情報管理に関する処理が煩雑になる。したがって、移動頻度の低い mesh STA には安定的なネットワーク接続を可能とすると同時に移動頻度の高い mesh STA にもネットワークへの参加を可能とするための、情報交換の時間間隔によらない経路制御手法が必要である。

そこで本稿では、衝突などによるデータパケット配送機会の喪失を回避するため、制御パケットを低減することに着目し、隣接する mesh STA どうしの情報交換のみで自律的にネットワークを構成する手法を提案する。mesh STA は、ネットワーク参加時に隣接する mesh STA から得られた情報を用いてアドレスを設定し、経路制御はこの各 mesh STA に設定されたアドレスに基づく。さらに、隣接する mesh STA からの情報提供に周期的に送信されるビーコンを用いることにより、移動頻度の低い mesh STA に関する通信に対して一定のパフォーマンスを確保し、かつ、移動頻度の高い mesh STA も収容することを可能とする。

## 2. 関連研究・技術

無線メッシュネットワークにおいて、経路の転送レートを個々に調整することでパケット転送効率の向上を図る研究がある [5], [6]. また、複数の経路から不要な経路を削除することで高いスループットを実現できる経路を残す手法もある [7]. これらはあらかじめ構築された経路上の転送レートを調整する手法であるため、本稿のような経路制御の方法との併用が可能である。本稿における提案手法と組み合わせることによりさらにパケット転送効率を向上させることができる可能性がある。

無線メッシュネットワークにおける輻輳制御や負荷分散によってパケット転送効率を向上させる手法に関する研究もいくつか行われている。無線メッシュネットワークにお

いて輻輳が発生した場合に、標準仕様に含まれるシグナリングメッセージを利用して迂回路を構築する手法 [8] も提案されている。この手法では、固定のグリッド状のネットワークトポロジにおいて外部ネットワークとの通信を前提とした評価を行い通信負荷の偏りや増加に対して有効であることを示している。ただし、リンク状態の変動や mesh STA の移動などをともなう可能性のある実際の環境に近い条件での評価が必要であるとしており、そのような場合における性能については不明である。

また、制御パケットの転送量を抑えることによってパケット転送率あるいはスループットの向上を達成しようとする研究もある。メッシュネットワークにおいて移動するユーザ端末を探索する際にハッシュ関数の特性を利用する研究 [9] がある。この研究では、mesh STA が担当する領域を分割し、ユーザ端末の情報を保持する mesh STA をユーザ端末の MAC アドレスのハッシュ値によって決定することによってユーザ端末の探索に必要な制御パケットの転送量を抑えることができるとしている。しかし、この手法では、定期的なフラッディングによって経路に関する情報を交換して経路を設定するプロアクティブ型経路制御プロトコルである RA-OLSR (Radio Aware Optimized Link-State Routing Protocol) の利用を mesh STA 間の経路制御の前提としている。さらに、経路に関する情報をリンク状態の変動や mesh STA の追加や削除の検知のためにも用いるため、フラッディングによる経路制御のためのパケット転送による影響は残る。

また、隣接 mesh STA とユークリッド平面上の位置情報などを交換し、ドローンオーバレイネットワークを構築し物理的に直接隣接しない近隣 mesh STA との迂回経路を構築する手法 [10] も提案されている。この手法を用いて制御パケットの交換を隣接 mesh STA との間でのみ行うことで、制御パケット量を減らしパケット転送率を向上できる。ただし、自らの位置情報を取得するための何らかの手段を併用する必要がある。

## 3. 自律的無線メッシュネットワークの構成法

本研究の目的は、通信が混雑した状況でも、パケット損失率が低い通信をより多く確保できる自律的な無線ネットワークの構成法を確立することにある。このために、直接通信可能な mesh STA 間でのみ経路制御に必要な制御パケットを交換する方式を導入する。これによって、ネットワーク全体で交換する経路制御情報に起因する負荷を軽減する。さらに、多様な移動特性を持つ mesh STA を収容でき、かつ、安定した無線ネットワークを構成するために、移動頻度の低い mesh STA の配下のノードによる通信品質の向上を図る。

したがって、提案手法では、mesh STA が周期的に送信するビーコンを使って、起点となる mesh STA からの距離

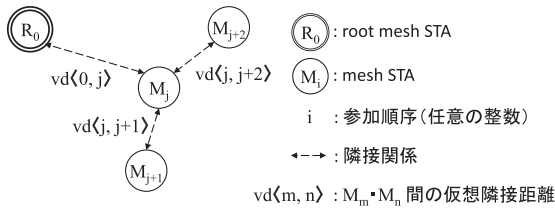


図 1 物理的な mesh STA の位置と隣接関係

Fig. 1 Physical locations and neighboring relationships of mesh STAs.

および経路に関する情報を伝播することによって、制御情報の通信量を抑える方針を採用した。また、新たにネットワークに参加する mesh STA は、受信ビーコン内の情報に加え、ビーコンの受信信号強度から推定した隣接 mesh STA との仮想距離を用い、自らの位置情報（アドレス）の設定および経路制御を行う。

これまでに著者らは、推定した mesh STA どちらの隣接関係を用いて経路設計ならびに経路制御のための基本的な手法を提案し [11]、さらに、その IPv6 ネットワークへ適用法を検討してきた [12]。本稿では、それらの基礎的検討に基づいて、移動頻度の低い mesh STA の通信性能を相対的に高く維持できるネットワーク構成法と経路制御手法を提案する。以下、本章では、仮想距離に基づくアドレス設定法およびこれに基づく経路制御手法について述べる。

### 3.1 仮想距離

各 mesh STA は電波範囲内の mesh STA から受信した信号の強度からその mesh STA との距離を推定し経路制御に用いる。直接通信可能な（隣接関係にある）mesh STA 間の推定距離は、実際の物理距離と必ずしも一致しない。よって、これを「仮想隣接距離」と呼び、mesh STA  $M_i$  と  $M_j$  との間の仮想隣接距離  $vd\langle i, j \rangle$  を式 (1) で定義する。

$$vd\langle i, j \rangle = \max \left\{ 1 - \sqrt{\frac{WS\langle i, j \rangle}{WS_{max}}}, 0 \right\} \quad (1)$$

ただし、 $WS\langle i, j \rangle$  は受信信号強度、 $WS_{max}$  は事前に定める受信信号強度の上限値である。この式では、受信信号強度が物理的な距離の  $x$  乗に反比例し、上限を 1 として  $WS_{max}$  により正規化するモデルを仮定している。よって、 $WS\langle i, j \rangle \geq WS_{max}$  の場合、 $vd\langle i, j \rangle$  は 0 となる。

任意の mesh STA  $M_m$  と  $M_n$  間の仮想距離  $VD(m, n)$  を、式 (2) に示すように、マルチホップ通信経路上の仮想隣接距離の和と定義する。

$$VD(m, n) = \sum_{(i, j) \in \mathcal{L}} vd\langle i, j \rangle \quad (2)$$

ただし、 $\mathcal{L}$  は  $M_m$  と  $M_n$  を結ぶ経路を構成する隣接関係  $\langle i, j \rangle$  の集合である。図 1 に示すネットワークでは、 $VD(0, j+1)$  は  $vd\langle 0, j \rangle + vd\langle j, j+1 \rangle$  となる。

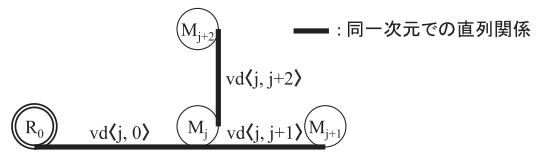


図 2 仮想的な mesh STA の位置と隣接関係

Fig. 2 Virtual locations and neighboring relationships of mesh STAs.

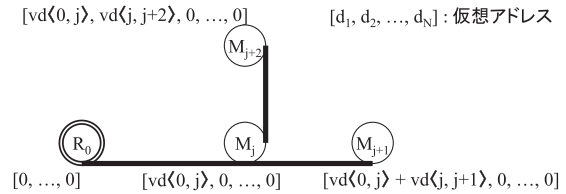


図 3 各 mesh STA における仮想アドレス

Fig. 3 Virtual addresses of mesh STAs.

### 3.2 仮想アドレス

提案手法における経路制御には、仮想距離に基づいて設定される仮想的なアドレスを用いる。この仮想アドレス  $D$  の形式を式 (3) のように定義する。

$$D = [d_1, d_2, \dots, d_k, \dots, d_N] \quad (1 \leq k \leq N) \quad (3)$$

ただし、 $d_k$  および  $N$  はそれぞれ、 $D$  を構成する第  $k$  次元の要素およびその次元数を表す。

mesh STA  $M_j$  は、それに隣接する mesh STA  $M_i$  の仮想アドレスと仮想隣接距離  $vd\langle i, j \rangle$  に基づいて自らの仮想アドレスを設定する。図 2 に、図 1 のネットワーク例に対して、 $M_j, M_{j+1}, M_{j+2}$  の順に各 mesh STA が参加した場合の仮想的なアドレス空間を表す。図中の直線は、仮想空間上において  $R_0, M_j, M_{j+1}$  が互いに通信可能な直列的位置関係にあることを示す。起点  $R_0$  からの仮想距離を、同次元上の仮想アドレス値へ写像する。複数の mesh STA が直列的位置関係にない場合、単一の次元では仮想アドレスを表現できない。よって、図 3 に示すように、 $M_{j+1}$  とは隣接関係にない  $M_{j+2}$  が参加した場合には、水平の直線と垂直の直線を組み合わせることで多次元の直列的な位置関係を表現する。

以上のことから、本提案手法において、仮想アドレス  $D$  の第  $k$  項の値は、第  $k$  次元目として派生した直線の起点となる mesh STA との間の  $k$  次元での仮想距離とする。この定義から、mesh STA  $M_i$  の仮想アドレスの各項の総和は、root mesh STA から  $M_i$  に至るマルチホップ通信経路の仮想距離となるため、後述する経路選択の基準として活用できる。また、root mesh STA  $R_0$  の仮想アドレスは、すべての項  $d_k$  が 0 となる。最大次元数が  $N$  であるとき、仮想空間上の次元である直線の派生は、初めの  $R_0$  からのものを含め  $N$  回までしか行えない。

提案手法では、mesh STA はネットワークに参加した際に仮想アドレスに加えて、それに付随する情報を設定する。

これらを総称して、仮想アドレス情報と呼ぶ。ただし、リンク状態が変化し仮想アドレス情報が利用できなくなった場合はそれらを再設定する必要がある。よって、既存 mesh STA が自身の仮想アドレス情報を含むビーコンを周期的に送信する。また、新たに参加する mesh STA は周期的に隣接 mesh STA からのビーコンの受信を試みる。

ビーコンは以下の仮想アドレス情報を含む。

- Network ID
- 送信元 mesh STA の仮想アドレス  $D$  ( $N$  次元)
- 送信元 mesh STA の端点フラグ ( $N$  次元)

Network ID は形成される仮想空間の同一性の確認のために使用される。具体的には、リンク切断時のネットワークの分割、リンク状態の復帰によるネットワークの再構築、別途構築されたネットワークとの融合、などに利用される。また、端点フラグは、各次元の端点に位置しているかどうかを表し、後述する仮想アドレス設定時に用いる。

この仮想アドレスを用いた隣接状況は、木構造状のネットワークを構成する。これは ZigBee における経路制御手法であるクラスタツリーの手法 [13] と類似している。しかし、仮想アドレスに基づく隣接状況の表現には仮想距離の概念が付加されているため、ネットワーク上の任意の2点間の仮想距離が算出でき、各 mesh STA 内で局所的により少ないホップ数の経路を選定できる特長がある。

### 3.3 自律的なネットワーク構成法

#### 3.3.1 ネットワークへの参加と離脱に対する基本動作

提案手法では、mesh STA は原点ノードである root mesh STA を起点としてネットワークを構成する。新規に参加した mesh STA は、隣接する mesh STA から受信したビーコンに含まれる仮想アドレス情報を基に自らのアドレスを設定する。この仕組みにより、mesh STA を順次ネットワークに組み入れることができる。

具体的には、3.2 節に述べた仮想アドレスの定義に基づいて、新たな mesh STA がネットワークへ参加する際には、

- 同次元内での参加
- 新たな次元での参加

がある。前者は、仮想空間上で直列的な位置関係に組み込める場合であり、元になる仮想アドレスにおいて使用された項のうち最後尾の項に仮想隣接距離を加算したものを新たな仮想アドレスとして設定する。後者は、仮想空間上で直列的な位置関係に組み込めない場合であり、新たに使用する項を仮想隣接距離の値に設定した仮想アドレスを設定する。たとえば、隣接する既存の mesh STA が1つしか存在せずに、それが端点である場合は前者に、端点ではない場合は後者となる。隣接する既存 mesh STA が複数存在する場合には、仮想アドレスの次元を可能な限り抑制しながら、無矛盾なアドレスを設定する必要がある。この点については、3.3.2 項に詳述する。

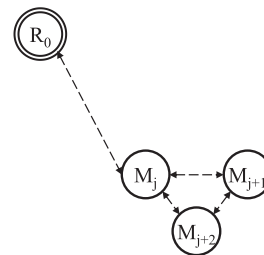


図 4 同次元で参加する場合の新規参加および既存 mesh STA (複数)

Fig. 4 Mesh STAs placement in case of participant on the same dimension.

各 mesh STA は、通信状況の変化や mesh STA の移動などによりネットワーク参加時に自らの仮想アドレスの基となる情報を得た mesh STA からのビーコンが受信されなかった場合、設定されたタイムアウト時間待機する。一時的なリンクの切断や隣接状況の変化が起こった場合でも、タイムアウト時間内に状況が復帰すれば何も処理は行われない。タイムアウト時間を経過してもビーコンが受信されない場合、mesh STA は自らの仮想アドレスを初期化し、新規参加と同様の処理を開始する。すなわち、直接通信が不可能となった該当 mesh STA との接続を切断し、新たに通信可能となった mesh STA からのビーコンによって再度ネットワークに参加する。これにより、移動する mesh STA を柔軟にネットワークの構成要素とすることができる。なお、仮想アドレスの再設定は、上位のネットワークアプリケーションによる仮想アドレスの探索が必要になりオーバーヘッドとなる。よって、mesh STA の軽微な移動や、mesh STA 間の電波状況の多少の変化などの場合でも、直接通信できる状況が変化していなければアドレスの再設定は行わない。

#### 3.3.2 仮想アドレスの自律的設定法

新規参加 mesh STA が2通りの参加形態のうちどちらを採用するかは、隣接 mesh STA の数、新規参加 mesh STA と各隣接 mesh STA との仮想隣接距離、隣接 mesh STA 間の仮想距離によって決める。仮想アドレスには最大次元数の制約があるが、多くの mesh STA を収容できるようにするために次元数をなるべく抑制する必要があるため、新規 mesh STA は可能な限り同次元内で参加するようにする。

隣接 mesh STA が複数で、新規 mesh STA が同次元で参加する場合について、図 4 を用いて説明する。ただし、新規参加 mesh STA を  $M_{new}$ 、仮想空間上で同一直線上の隣接 mesh STA のうち、最も root mesh STA に近いものを  $M_{near}$ 、最も遠いものを  $M_{far}$  とする。この図において、添え字の値が小さい mesh STA から順にネットワークに参加するものとする。そのとき、 $M_{new}$  と  $M_{near}$  および  $M_{far}$  との仮想隣接距離が、 $M_{near}$  と  $M_{far}$  との間の仮想距離よりも小さい、すなわち、 $vd(j, j+2) < VD(j, j+1)$  かつ  $vd(j+1, j+2) < VD(j, j+1)$



図 5 同一次元で参加する場合における mesh STA の仮想的な配置  
**Fig. 5** Virtual mesh STA placement in case of participant on the same dimension.

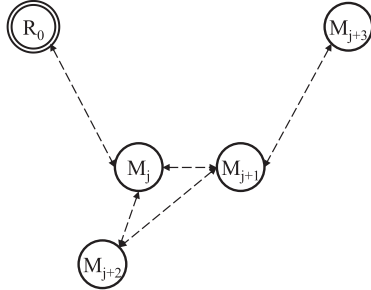


図 6 新たな次元で参加する場合 b) における mesh STA の配置  
**Fig. 6** Mesh STA placement in case b) of participant on a new dimension.

であれば、 $M_{j+2}$  は  $M_{near}$  である  $M_j$  の仮想アドレス情報をもとに同一次元でネットワークに参加する。図 5 はそのときの仮想区間上での隣接関係を表す。

新規参加 mesh STA が同一次元上に参加することで隣接しない mesh STA 間の仮想距離が 1 以下となる場合がある。これは、3.1 節の仮想隣接距離の定義と矛盾する。この場合、経路制御において次ホップとして適切でない mesh STA が選択され、ホップ数が増加する、あるいは、経路がループする、恐れがある。これらを防ぐために、隣接しない mesh STA 間の仮想距離が 1 以下になる可能性が高い場合に、新規参加 mesh STA は新たな次元で参加する。具体的には、以下の場合である。

- a)  $M_{near}$  が端点でなく、唯一の隣接 mesh STA である場合
- b)  $M_{new}$  と  $M_{far}$  との仮想隣接距離が  $M_{near}$  と  $M_{far}$  との仮想距離よりも長い場合
- c)  $M_{new}$  と  $M_{near}$  との仮想隣接距離が  $M_{near}$  と  $M_{far}$  との仮想距離よりも長く、 $M_{far}$  が端点でない場合

a) の具体例を図 1 を用いて説明する。mesh STA  $M_{j+2}$  が参加したときには、隣接 mesh STA は  $M_j$  のみであり、かつ、端点ではないので、新たな次元で参加する。よって、 $M_{j+2}$  の仮想アドレスは  $[vd(0, j), vd(j, j+2), 0, \dots, 0]$  となる。

b) の具体例を図 6 に示す。 $M_{j+2}$  が新規に参加した場合、 $M_j$  が  $M_{near}$ 、 $M_{j+1}$  が  $M_{far}$  である。 $M_{j+2}$  は、隣接 mesh STA と同一次元内に参加することで後に  $M_{j+3}$  が参加してきたときにそれとの仮想距離が 1 以下になる状況为了避免するために、新しい次元で参加する。図 7 はそのときの仮想空間上の位置関係を図示しており、 $M_{j+2}$  の仮想アドレスは a) と同様に設定される。

c) の具体例を図 8 に示す。 $M_{j+3}$  が新規に参加した場合、

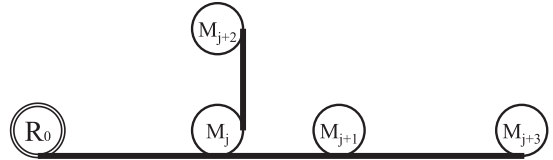


図 7 新たな次元で参加する場合 b) における mesh STA の仮想的な配置  
**Fig. 7** Virtual mesh STA placement in case b) of participant on a new dimension.

図 8 新たな次元で参加する場合 c) における mesh STA の配置  
**Fig. 8** Mesh STA placement in case c) of participant on a new dimension.

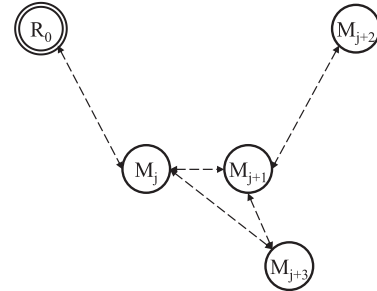


図 9 新たな次元で参加する場合 c) における mesh STA の仮想的な配置  
**Fig. 9** Virtual mesh STA placement in case c) of participant on a new dimension.

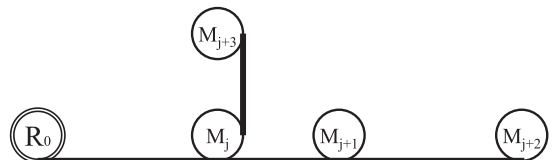


図 9 新たな次元で参加する場合 c) における mesh STA の仮想的な配置  
**Fig. 9** Virtual mesh STA placement in case c) of participant on a new dimension.

図 9 新たな次元で参加する場合 c) における mesh STA の仮想的な配置  
**Fig. 9** Virtual mesh STA placement in case c) of participant on a new dimension.

$M_{j+1}$  が  $M_{far}$ 、 $M_j$  が  $M_{near}$  である。このときも、 $M_{j+3}$  は、隣接 mesh STA と同一次元内に参加することで  $M_{j+2}$  と隣接していないにもかかわらずそれとの間の仮想距離が 1 以下になるのを避けるために、b) と同様に、新しい次元で参加する。図 9 はそのときの仮想空間上の位置関係を表している。

### 3.4 仮想アドレスを用いた経路制御

mesh STA の仮想アドレスは、root mesh STA からその mesh STA に至る経路がどの直線から形成されるかを表している (図 3)。隣接状況を俯瞰的に表現した場合、mesh STA の持つ仮想アドレスの各要素は、root mesh STA および各直線の起点間の仮想距離、および最後の起点から当該 mesh STA までの仮想距離を示しているため、この情報を用いれば経路選択が可能になる。

すなわち、各 mesh STA では、仮想アドレスの値に基づいて隣接する mesh STA の中から宛先 mesh STA に最も近い mesh STA を転送先として選定する。送信元 mesh STA と隣接 mesh STA の仮想アドレス情報のみを用いて自律的に経路選択される。また、この過程において仮想アドレス

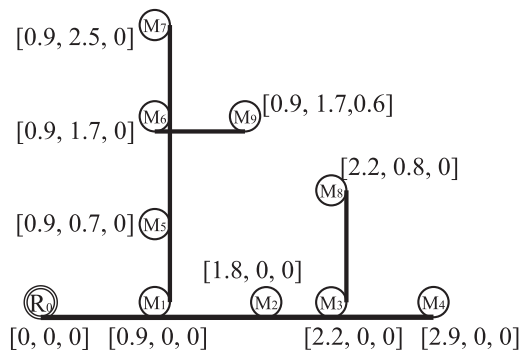


図 10 mesh STA 間の多次元隣接関係と各仮想アドレスの例  
 Fig. 10 An example of multi-dimensional mesh STAs and their virtual addresses.

が表現する隣接関係は考慮されないため、仮想アドレスの観点で隣接していない mesh STA であっても直接通信可能であれば次ホップとして選択することが可能であり、この場合仮想アドレス情報に基づく経路より短い経路が選択できることになる。

図 10 の隣接関係図を用いて、経路制御の例を示す。この例では、仮想アドレスの要素数  $N$  は 3 である。各 mesh STA  $M_j$  の  $j$  はこのネットワークへの参加順序である。送信元が  $M_8$  であり、送信先が  $M_5$  である場合、 $M_3$  および  $M_1$  にて経路選択が行われる。 $M_3$  では、送信先  $M_5$  の仮想アドレスと、隣接 mesh STA  $M_2$  および  $M_4$  の仮想アドレスとが比較される。仮想アドレスおよび仮想距離の定義により、 $M_2$  から  $M_5$  までの仮想距離は 1.6 ( $=1.8-0.9+0.7$ ) であり、 $M_4$  から  $M_5$  までの仮想距離は 2.7 ( $=2.9-0.9+0.7$ ) であるため、転送先として  $M_2$  が選択される。

これらより、提案手法では root mesh STA から伝播するアドレス情報を基に経路制御を行うことができ、ゲートウェイを起点とした木構造を利用する距離ベクトル型の経路制御が可能になる。加えて、仮想アドレスに基づく経路制御によって隣接 mesh STA との仮想アドレス情報交換のみで自律的に経路制御が可能であり、制御パケットを必要最小限に抑えられると同時に、新規参加 mesh STA が隣接 mesh STA とのメッセージ交換で仮想アドレスの設定を行った直後に双方向の経路制御も可能である。よって、数時間あるいは数日のような期間で一時的に設置・変更・撤収されるような一時的な高負荷ネットワークでも、仮想アドレスが自律的に設定されるため、管理・運用コストを低減できることが期待される。

これまで述べたように、提案手法により、新規に参加した mesh STA は隣接する mesh STA からの情報をもとに自らの仮想アドレスを設定し、また、隣接状況の変化に応じてネットワークに対し離脱や再接続を行うことができる。これにより、移動頻度の高低に応じて異なるネットワーク構成法を適用する必要がない。さらに、移動頻度の低い mesh STA が設定した仮想アドレスをもとに経路制御が行

われることで安定的な経路が確保されるため、提案手法はデータストリームに対して高いネットワーク品質を提供する特徴を備えているといえる。

#### 4. パケット転送率による性能評価

提案方式では、経路制御のためのパケット交換回数が全体的に抑制されるため、データストリームのパケットの送信機会の増加が期待できる。一方で、mesh STA が移動する場合の影響や経路上の mesh STA が得られる情報のみで探索される経路が限られる場合の影響についても考慮する必要がある。そこで、本章では、安定したネットワークを構成するために重要な役割を果たす移動頻度の低い mesh STA を介する通信について、特に、ネットワーク品質の影響を受けやすい音声や映像といったメディアストリームを対象に、パケット転送率を指標として性能評価を行った。

##### 4.1 想定環境およびシミュレーション条件

想定するネットワーク環境およびシミュレーション条件を以下で述べる。シミュレーションにおける評価では、一定条件下における一般的な性能を評価するために想定するアプリケーションを細かく限定しない。

シミュレーションには、ネットワークシミュレータである Qualnet (v. 6.1) を用いた。提案手法を無線メッシュネットワークの標準規格と置き換え可能なように実装し、それ以外のコンポーネントやライブラリは同一とした。使用した無線 LAN 規格は IEEE802.11g である。また、空間モデルは、自由空間モデルとし、信号が受信可能な距離の限界が 100 m となるようアンテナの閾値を設定した。

空間は 100 m × 1,400 m の矩形領域とした。これは、直線状に機器が散在する汎用的な環境を想定したためである。たとえば、道路、線路、河川などの周辺に機器を配置するような場合に相当する。1 台の mesh STA を空間の中央に配置し、以降に新規に参加する mesh STA は、他のいずれかの mesh STA との距離が 80 m 以内、かつ、20 m 以上の条件内でランダムに配置した。mesh STA の移動特性として、移動頻度の低い mesh STA と高い mesh STA の 2 種類を想定した。シミュレーションでは、移動頻度の低い mesh STA が静止している期間を想定して評価するために、移動速度は 0 とした。移動頻度の高い、すなわち移動する mesh STA の移動速度は 1.12 m/s とし、ランダム時間移動したのちランダム方向に向きを変えたとした。mesh STA の総数は 40 とし、移動する mesh STA の割合は全体の 0% (0 台)、20% (8 台) とした。中心に位置する mesh STA を root mesh STA とした。

ネットワーク上のストリームとして音声通話データを想定し、パケットサイズは 172 B、パケット送信間隔は 20 ms、送信時間は 10 s、とした。ストリームでネットワークが混雑している状況を想定し、各 mesh STA 配下で発生するス

トリームの送受信は、平均 1.0~2.0 本のポアソン到着を仮定した。シミュレーション時間は 180s とした。また、すべてのストリームの送信元あるいは送信先を root mesh STA とした。音声などのメディアストリームでは、コーデックによって具体的な値は異なるものの、パケット転送率はアプリケーション品質に大きく影響する要素である。そのため、ネットワークの性能評価においてストリームごとのパケット転送率に着目する。具体的には、ネットワークが混雑した状況下においてメディアストリームごとのパケット転送率を算出し、パケット転送率が高い（主に 95-100%）ストリームの本数に着目した。

また、mesh STA のビーコン送信間隔は一般的な 200ms を用いた。受信ビーコン情報の更新可能な機会を複数回設けるために、受信ビーコンの有効期限を 2s、mesh STA が受信ビーコン情報から隣接 mesh STA リストを更新する間隔を 500ms とした。この場合、各 mesh STA は、自身の仮想アドレスの基になった仮想アドレスを持つ mesh STA からビーコンが受信できなくなってからおおよそ 2-2.5 秒の間に自らの仮想アドレスを初期化する。

評価における比較手法として、無線メッシュネットワークの標準規格である IEEE802.11s において規定されている HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) を用いた。HWMP では、無線マルチホップネットワークにおけるリアクティブ型の経路制御プロトコルである AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing) [14] を基にした RM-AODV (radio metric AODV) を用いる。さらに、root mesh STA が存在している場合は RM-AODV とプロアクティブ型の経路制御プロトコルである TBR (Tree base routing) も用いることができる。HWMP は、これらの併用によって、様々な移動頻度の mesh STA を効果的に収容できるよう規格化されているため、比較のための既存手法として選定した。

mesh STA の配置、および、発生するストリームの条件は提案手法と既存手法において同一とした。また、シミュレーションは各条件下で 35 試行ずつ実施し、それらを平均した値を評価結果とした。

#### 4.2 シミュレーションによるパケット転送率の評価

提案手法は、移動頻度の低い mesh STA を安定したネットワークを構成するために重要であると見なし、それらの配下のノードにて送受信される通信の品質の向上を目指す。評価では、メディアストリームのパケット転送率を通信の品質の指標として採用し、既存手法との性能比較を行った。音声などのメディアストリームを想定しているため、パケット転送率が 50% から 100% のストリームの数に着目した。ストリーム数は、ネットワーク上のすべてのメディアストリームを対象としてカウントした。

まず、移動頻度の低い mesh STA に関する一般的な性能

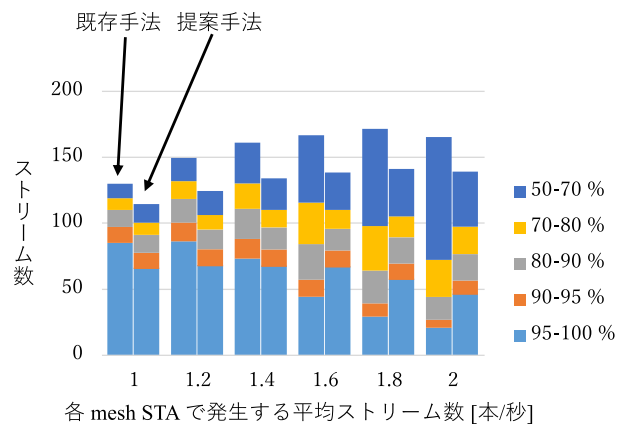


図 11 パケット転送率分類別ストリーム数（移動割合：0）

Fig. 11 Distribution of packet transfer rate (Moving STA ratio: 0).

評価として、すべての mesh STA が静止している場合の結果を示す。図 11 にて、提案手法および既存手法におけるパケット転送率の分布を示す。横軸は各 mesh STA での 1 秒間に発生する平均ストリーム数、縦軸はパケット転送率が 50% 以上のメディアストリーム数、を示す。縦軸のパケット転送率が 50% 以上のメディアストリーム数に関しては、パケット転送率がそれぞれ、50-70%、70-80%、80-90%、90-95%、95-100% のメディアストリームごとに分類した。図においては、各 mesh STA での 1 秒間に発生する平均ストリーム数ごとに提案手法および既存手法の結果を示した。図 11 より、パケット転送率が 95-100% のストリーム数に着目すると、各 mesh STA で 1 秒間に発生する平均ストリーム数が 1.6 以上のとき提案手法が優位となり、具体的には、それらの値が、1.6 のときに約 52%、1.8 のときに約 98%、2.0 のときに約 123% の差があった。また、提案手法では、各 mesh STA での 1 秒間に発生する平均ストリーム数が増加する場合でもパケット転送率が 95-100% のストリーム数の減少が抑えられている。これは、ネットワークがより高負荷となる状況下でも多くのストリームの品質が保証できたことを示している。このことから、提案手法を適用した場合、負荷の変化に対してパケット転送率が高いメディアストリームの本数が安定しているといえる。また、パケット転送率が 70% 以上のストリーム数に関しても既存手法より提案手法が優位である。一般に音声を含むメディアストリームでは、具体的な品質あるいは各種の値はコーデックなどに依存するものの、パケット転送率が高い（パケットロス率が低い）ことが求められるため、提案手法が有効であることが分かる。

次に、図 12 にて、移動頻度の高い mesh STA が全体の 20% の場合の各 mesh STA での 1 秒間に発生する平均ストリーム数に対するパケット転送率が 50% 以上のメディアストリーム数に関する結果を示す。縦軸のパケット転送率が 50% 以上のメディアストリーム数に関しては、先

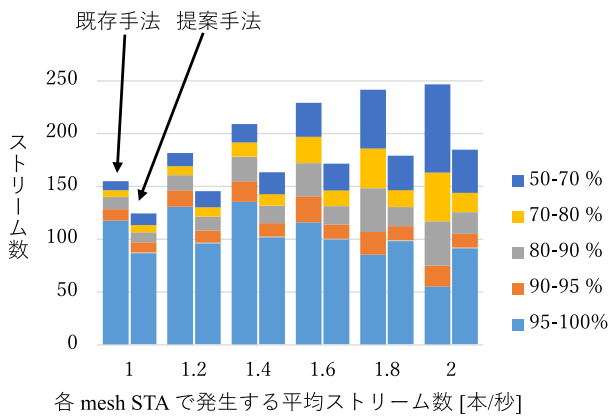


図 12 パケット転送率分類別ストリーム数 (移動割合: 0.2)

Fig. 12 Distribution of packet transfer rate (Moving STA ratio: 0.2).

の結果と同様に分類した。図 12 より、パケット転送率が 95–100% のストリーム数に着目すると、各 mesh STA で 1 秒間に発生する平均ストリーム数が 1.8 以上のとき提案手法が優位となり、具体的には、それらの値が、1.8 のときに約 14%、2.0 のときに約 65% の差があった。また全 mesh STA が静止している場合と同様に、提案手法では、各 mesh STA での 1 秒間に発生する平均ストリーム数が増加する場合でもパケット転送率が 95–100% のストリーム数の減少が抑えられている。このことも、ネットワークがより高負荷となる状況下でも多くのストリームの品質が保証できたことを示している。また、パケット転送率が 80% 以上のストリーム数に関しても提案手法が優位である。いずれの手法においても、すべての mesh STA が静止している場合に比べてストリーム数が多いのは、一部の mesh STA が root mesh STA に近づく機会が増えることによりホップ数が抑えられたためであると考えられる。

これらより提案手法は、音声通話データを想定したストリームのパケット転送率を指標としたとき、既存手法と比べて高いパケット転送率を達成したストリーム数が増えることが分かった。すなわち、移動頻度の低い mesh STA 配下のノードにて送受信される通信の品質をより保証できることが分かった。さらに、ネットワークの負荷によらず高いパケット転送率を達成したストリーム数の減少が抑えられていることから、データ損失に厳しいメディアデータストリームに対して安定的な品質を保証できるといえる。ただし、パケット到達率の下限を 50% としたとき、既存手法の総数が多くなった。これは、提案手法はその特性上、ホップ数が増加する傾向にあるため、多くの mesh STA による転送を必要とするストリームの品質が低下したと考えられる。

## 5. おわりに

無線メッシュネットワークにおける経路制御には mesh

STA 間での情報交換が必要である。ただし、そのための通信によってデータパケット配送の機会を奪う可能性がある。また、移動頻度の高い mesh STA に対応するために情報交換の機会を増やすことは、移動頻度の低い mesh STA に対しては過剰である。

これらの課題に対して、本稿では、mesh STA の異なる移動特性に対して同一の手法でネットワークへ収容することを可能としながら、ネットワークを構成する際に重要な移動頻度の低い mesh STA に関する通信の品質をより保証するための手法を提案した。具体的には、各 mesh STA が、隣接する mesh STA から周期的に送信されるビーコンによる情報交換のみで自らのネットワーク上の位置を設定するとともに経路制御を行う。さらに、シミュレーションによる性能評価において、移動頻度の低い mesh STA 配下のノードが送受信するストリームのパケット転送率が高いストリーム数に関して既存手法より優位であることを示した。

今後の課題として、高負荷時に一部の mesh STA がビーコン受信のタイムアウト処理により、静止している mesh STA でありながら転送先候補から除外されたことによる性能の低下がある。そのため、mesh STA の移動特性により追従できることを目指し、パケットの転送先候補となる隣接 mesh STA の管理をトークンによって行う方式を検討している。これは、ビーコンの最終受信時刻からのタイムアウトではなく、ビーコンの受信によって加算し、ビーコンの受信に関するタイムアウトによって減算するトークンを用いる方式である。特定の mesh STA がパケットの転送先候補のリストに残されるかどうかをトークンの有無で判断する。この方法を採用することによって、ネットワークが混雑した状況下でも静止している mesh STA がパケットの転送先候補から除外される確率を低下させることができ、さらなる性能の向上が期待できる。

## 参考文献

- [1] IEEE Standards Association: IEEE Standard for Information Technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standard 802.11 (2011).
- [2] Akyildiz, I.F., Wang, X. and Wang, W.: Wireless mesh networks: A survey, *Computer Networks*, Vol.47, pp.445–487 (2005).
- [3] 阪田史郎, 青木秀憲, 間瀬憲一: アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネットワーク, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J89-B, No.6, pp.811–823 (2006).
- [4] 間瀬憲一, 阪田史郎: アドホック・メッシュネットワーク—ユビキタスネットワーク社会の実現に向けて, コロナ社, 東京 (2007).
- [5] 坂本貴彦, 間瀬憲一: 無線メッシュネットワークにおける最適レート推定のためのリンク品質測定制御法, 電子情



- 報通信学会論文誌, Vol.J95-B, No.7, pp.819-826 (2012).
- [6] 岡田 啓, 北原弘隆, 間瀬憲一: 無線メッシュネットワークにおけるノード単位送信レート選択手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J94-B, No.12, pp.1556-1565 (2011).
- [7] 高橋義彦, 兼子陽市郎, 間瀬憲一: 無線メッシュネットワークにおける高スループット経路選択に関する実験的検証, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J90-B, No.3, pp.311-314 (2007).
- [8] 西沢耕太郎, 山本尚生: 無線メッシュネットワークにおけるふくそう制御用シグナリングと連携した迂回路構築アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J92-B, No.9, pp.1500-1512 (2009).
- [9] 門馬玲志, 山田拓也, 山本尚生: 大規模な無線メッシュネットワークにおけるハッシュ関数を利用した STA 位置登録・探索方式の特性評価, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J93-B, No.7, pp.1025-1030 (2010).
- [10] Ohnishi, M., Inoue, M. and Harai, H.: Incremental Distributed Construction Method of Delaunay Overlay Network on Detour Overlay Paths, *Journal of Information Processing*, Vol.21, No.2, pp.216-224 (2013).
- [11] Ueda, K. and Baba, K.: Proposal of Initial Route Establishment Method in Wireless Mesh Network, *Proc. The Sixth Workshop for Ubiquitous Networking and Enablers to Context-Aware Services*, pp.173-176 (2009).
- [12] Maruoka, Y. and Ueda, K.: A method for establishing routes and IPv6 addressing based on the estimated distance from neighboring nodes in wireless mesh networks, *Proc. 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, pp.21-26 (2013).
- [13] 鄭 立: ZigBee 開発ハンドブック, リックテレコム (2006).
- [14] Perkins, C.E., Belding-Royer, E.M. and Das, S.R.: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, IETF RFC 3561 (2003).



植田 和憲 (正会員)

平成 10 年大阪府立大学工学部数理工学科卒業。平成 12 年大阪大学大学院博士前期課程修了。平成 13 年同大学院退学。同年大阪大学大学院国際公共政策研究科助手。平成 16 年高知工科大学電子・光システム工学科講師。平成 21 年同大学情報学群講師。情報ネットワークの研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



岩田 誠 (正会員)

昭和 61 年大阪大学工学部電子工学科卒業。平成 3 年同大学大学院博士課程単位取得退学。同年同大学院工学研究科助手, 平成 9 年高知工科大学助教授, 平成 14 年同教授, 現在に至る。その間, 平成 14 年東北大学通研 IT21 センター客員助教授, 平成 18 年同客員教授を兼務。平成 20 年カリフォルニア大学アーバイン校客員研究員。博士 (工学)。データ駆動パラダイムを核とした, ソフトウェア環境および ULSI 向きアーキテクチャの研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



馬場 健一

平成 2 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。平成 4 年同大学院博士前期課程修了, 同年同博士後期課程退学。同年同大学情報処理教育センター助手, 平成 9 年高知工科大学電子・光システム工学科講師, 平成 10 年大阪大学大型計算機センター助教授, 平成 12 年大阪大学サイバーメディアセンター助教授, 平成 19 年同准教授。平成 26 年工科大学工 (現情報) 学部情報通信工学科教授。博士 (工学)。広帯域ネットワーク, コンピュータネットワーク, フォトニックネットワークシステムの性能評価に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



下條 真司 (正会員)

昭和 61 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学院基礎工学研究科助手。平成元年同大学大型計算機センター講師。平成 3 年同助教授。この間米国カリフォルニア大学アーバイン校客員研究員。平成 10 年大阪大学サイバーメディアセンター教授・副センター長。平成 17 年同センター長。平成 18 年同副センター長, 平成 20 年独立行政法人情報通信研究機構上席研究員, 平成 27 年大阪大学サイバーメディアセンター教授・センター長, 現在に至る。マルチメディア応用システム, peer-to-peer コミュニケーションネットワーク, ユビキタスネットワークシステム, グリッド技術等の研究に従事。工学博士。志田林三郎賞, 日本医用画像工学会論文賞, 大阪科学賞受賞, 情報化促進貢献個人等表彰, 総務大臣表彰。電子情報通信学会, IEEE 各会員。本会フェロー。