

無線メッシュネットワークにおける隣接関係を考慮した経路確立手法の有効性検証

丸岡 優大^{†1} 植田 和憲^{†1}

既存の無線ネットワークに対して、メンテナンスの容易性、堅牢性、設置コストの低減など様々なメリットを持つネットワークとして無線メッシュネットワークが存在する。無線メッシュネットワークでは、各ノード同士が自律的にパケット中継を行う必要があるため既存の無線ネットワークに対して複雑な制御機構が必要となっており、現在までに様々な特徴を持つ制御手法が提案されてきた。本研究では、無線メッシュネットワークの制御に使用される通信を可能な限り少なくすることを目的とし、隣接関係を考慮したルーティング手法 MBCR の改良とネットワークシミュレータを使用した有効性検証を行った。

Routing method based on neighboring relationship in Wireless Mesh Networks

YUTA MARUOKA^{†1} and UEDA KAZUNORI^{†1}

The Wireless Mesh Networks have easy network maintenance, robustness, low cost set up and many advantages than existing wireless network. However, each node of WMNs need self configuration and self relay data packets that complex control than existing wireless networks. The purpose of our research is cutdown all the possible control communication in WMNs. Therefore our research group improved MBCR that routing method based on neighboring relationship and, we were verified availability using network simulator.

^{†1} 高知工科大学

Kochi University of Technology

1. はじめに

近年、無線ネットワークの効率化に関する社会的な需要は高まっている。背景には、無線ネットワークへの接続機能を搭載したデバイスの増加と、ネットワークを利用するサービスコンテンツの増加がある。これらの需要に即する形で、現在、様々な無線ネットワーク技術が提案され研究されている。既存の無線ネットワークに対してメンテナンスの容易性、堅牢性、設置コストの削減など、様々な利点がある無線メッシュネットワークもその一つである。

無線メッシュネットワークでは、無線アクセスポイント間の通信を既存の有線による通信から無線による通信に置き換えることにより、自由なアクセスポイントの設置と複数経路を利用した堅牢性の高い通信を行えるようにすることを目的としたネットワークである。無線メッシュネットワークでは、既存の無線ネットワークにはない、無線による自律的な通信経路の制御を行う必要があり、制御方法によってネットワークの性能が大きく変化する。その為、現在までに様々な特徴を持つ制御手法が提案されてきた。

本研究では、無線ネットワークの制御に使用される通信を可能な限り少なくすることを目的として、隣接関係を考慮して仮想的な位置情報を作り出し、その位置情報を用いて通信を行うルーティング手法 MBCR の改良と有効性の検証を行った。既存の MBCR では、隣接関係を利用して仮想的な位置情報を作成する機能までが提案されていたが、本研究では、位置情報を用いた通信経路確立手法の提案も新たに行った。また、既存の無線メッシュネットワークルーティング手法である HWMP¹⁾ に対して、MBCR が使用する制御通信がどの程度のものであるのかをネットワークシミュレータを用いて比較検証を行った。

2. 関連技術・研究

本研究に関連する技術として、無線マルチホップ通信と無線メッシュネットワークを紹介する。

2.1 無線マルチホップ通信

既存の無線ネットワーク通信では、アクセスポイントノードとクライアントノードによるインフラストラクチャ通信による通信方法と、ノード同士の通信を行うアドホック通信の2つの通信方法が利用されている。現在のアドホック通信では、同時に通信を行うことができるノード数は1ノードに限られている。そのため、適用可能なネットワークが限定されている。アドホック通信を利用して複数の通信対象に対して通信を行ったり、いくつかのノード

ドを中継したデータパケットの配送を行うことを可能にする技術として無線マルチホップ通信が提案されている。無線マルチホップ通信では、ノードは互いに対等の関係でネットワークの維持と通信を行う。また、電波の直接届かない遠方のノードに対しても、複数のノードを中継（ホップ）することで通信を行うことが可能である。しかし、遠方のノードに対してデータパケットを送信する際には、次にデータパケットを中継すべき経路を決定する処理が必要である。無線マルチホップ通信においてこれらの経路の決定選択と決定を行う機能はルーティングプロトコルによって提供される。

2.2 無線メッシュネットワーク

無線メッシュネットワークは、既存のインフラストラクチャ通信におけるアクセスポイント間の通信に無線マルチホップ通信を利用した無線ネットワーク技術である²⁾³⁾。網の目（メッシュ）上に配置されたアクセスポイントが、それぞれ別アクセスポイントに対してデータパケットを中継することによりデータの配送を可能にする。無線マルチホップ通信を利用するため、既存のインフラストラクチャ通信による無線ネットワークに対して、有線ネットワークの有無に左右されない自由なアクセスポイントの配置や、障害の発生したノードを迂回した経路の選択を行うことを可能にできる利点がある。図1は、無線メッシュネットワークの一例を表したものである。無線メッシュネットワークに参加するノードは、表1に示す通り機能と役割別に4種類に分類されている。4種類のノードの中でSTA以外はMPの機能を持っており、メッシュ機能を利用したパケット中継を行うことが可能である。また、メッシュ機能を持たないノードもネットワークに参加可能にするために、MAPではインフラストラクチャ通信によるアクセスポイントの機能を提供する。MPの機能を持つノード同士は自律的に動作を行い、ネットワークの維持とデータパケットの配送を行う必要がある。これらの経路制御にかかわる機能を提供する無線メッシュネットワークのルーティングプロトコルには様々な手法が提案されている。

3. 隣接距離を基にしたルーティング

本章では、本研究グループで提案してきた無線メッシュネットワークにおける隣接距離を基にしたルーティング手法MBCR⁴⁾をルーティングプロトコルとして規定した。手法の解説と動作の手順の説明を行なう。

3.1 MBCRの概要

MBCRは無線ネットワーク上で、ネットワークの維持やデータ配送の際の制御に用いる制御パケットを可能な限り少なくすることを目的としている。制御パケットは、主に通信経

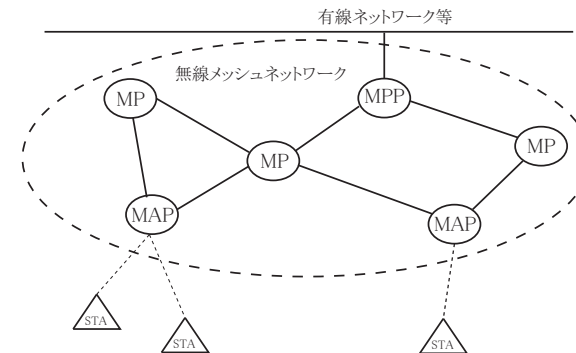


図1 無線メッシュネットワークの例

路決定の際のメッセージ交換やルーティングテーブルの交換の際に各ノードで送受信されるパケットである。MBCRは、無線メッシュネットワークにおいて制御パケット数の増減に大きく影響するルーティングについて、隣接関係を基にした仮想的な位置情報を作成し、作成した位置情報を用いてルーティングを行なうことで制御パケットの少ない経路構築と通信を可能にする。

プロトコル仕様としてMBCRはOSI参照モデルのネットワーク層に分類されるルーティングプロトコルである。ただし、隣接関係把握のためにデータリンク層で処理されている情報を一部を利用する。また、MBCRが適用できる環境はIEEE802.11で規格化されている無線ネットワークに限られ、物理層の仕様としてIEEE802.11a/b/gを想定している。

MBCRでは、ルーティングの動作のために独自の位置情報である仮想空間と仮想アドレスの概念を用いる。仮想空間は実際のノード配置を基に、木構造によってノードの位置を表

表1 無線メッシュネットワークのノード

ノードの種類	機能と役割
MP(Mesh Point)	メッシュを利用して通信を行うノード。メッシュ上でパケットの中継などを行える。
MPP(Mesh Portal)	MPに外部ネットワークへのゲートウェイの機能を付与したもの。有線ネットワークとの接続点に用いられる。
MAP(Mesh Access Point)	MPにメッシュ機能を持たないノード(STA)を接続するためのアクセスポイントとしての機能を提供する。
STA(station)	メッシュ機能を持たないノード。従来のインフラストラクチャ通信によりMAPをアクセスポイントとすることで通信を行う。

現する。仮想アドレスは、ノードのネットワーク上での固有のアドレスとして利用し、実空間の配置とノードのネットワークへの参加順序を基に決定を行う。また、仮想アドレスの値からノードの仮想空間上での位置の把握が可能であり、仮想アドレスを基にしたルーティングを行う際にも利用する。ノードはネットワークへ参加する際に、周辺ノードとのメッセージ交換により自ノードの仮想アドレスを決定する。また、仮想アドレス決定後にデータパケットの送信要求が発生した場合に仮想アドレスの値を用いた通信経路探索処理を行ない、データパケットの宛先までの経路確立を行なう。データパケット配送時には宛先ノードまでの適切な経路をパケットヘッダに付与し、パケットが確実に宛先ノードまで到達するように経路制御を行なう。これらが MBCR による経路確立手法の概要である。

3.2 仮想空間と仮想アドレスの決定動作

MBCR で用いる仮想アドレスは、仮想距離と端点フラグの 2 つの情報で表す。これらの情報を図 2 のフォーマットで表す。このフォーマットでの上段の数字は仮想空間上での枝の根からのノード距離である仮想距離を表し、下段は仮想空間上で枝の末端であるかどうかを示す端点のフラグを表す。また、それぞれ仮想空間上で枝分岐する際に、新しい次元が付与される。新しい次元での情報は、既に決まっている次元の右側に順次追加されていく。すべての次元の数を階層次元数と呼び、階層次元数により仮想空間上での頂点ノードからの枝分岐数を把握することが可能である。また、最も右側の階層次元を最大次元と呼ぶ。

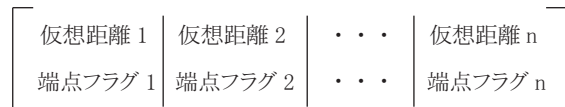


図 2 仮想アドレスのフォーマット

図 3 は仮想アドレスを用いて MBCR の木構造を表現している例である。この例では、ノードは A から順にアルファベット順にネットワークに参加していき、ノード D がノード B の子ノードとして追加された場合を表している。仮想アドレスによる木構造では、アドレス次元の 1 次元が仮想距離 0.0 であるノードが MBCR ネットワーク全体の原点となる (図 3 の A ノード)。また、木構造の分岐のたびに仮想アドレス次元は新しい次元を追加する。つまり、アドレス次元における仮想距離 0.0 を持つノードは、新しい枝の原点ノードとなる (図 3 の B ノード)。木構造の最底辺にあたる葉ノードは仮想アドレスの端点フラグによって表現する。各枝の端点フラグ 1 を持つノードは、その枝の末端ノードであることを表す。

端点フラグ 1 を持つノードは、各枝において 1 ノードのみ存在する。

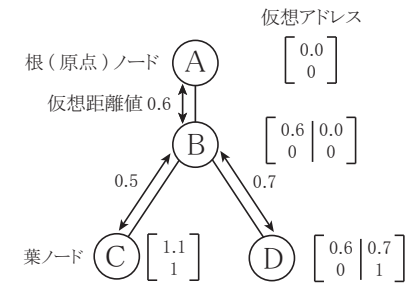


図 3 木構造との対比

仮想アドレスにおける仮想距離は仮想空間上でノードが新規参加した際に、隣接するノードの仮想アドレスとノード間の受信電波強度を基に算出される。計算の第一手順としてノード間の物理距離の推定を行なう。ノード間の物理距離の推定には、フリスの伝達公式を基に行われる。メッセージ交換によって取得した受信電波強度 $Pr[\text{dBm}]$ 、ノードの送信電波強度 $Pt[\text{dBm}]$ を用いて、

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{Pt}{Pr}} \quad (3.1)$$

によりノード間の物理距離を得る。第二手順では、第一手順で得られた $r[\text{m}]$ を式 (3.2) の式を用いて最大電波到達距離 $r_{\text{max}}[\text{m}]$ で除算する。第二手順により物理距離を最大電波到達距離で正規化した仮想距離 Vr を得ることができる。この計算の際の最大電波到達距離にはノードの送信電波出力から計算される値を用いる。

$$Vr = \frac{r}{r_{\text{max}}} \quad (3.2)$$

仮想アドレスを決定する際には、周辺ノードの仮想アドレスと位置関係により 3 つの仮想アドレス決定パターンを利用したノードの仮想アドレスの決定を行う。仮想アドレスの決定はノードがネットワークに新規参加する際に行なわれ、新規参加の際の周辺ノードの電波強度と仮想アドレス関係により、3 つのパターンで仮想アドレスの決定を行なう。それぞれ

のパターンと、新規参加の際の仮想アドレスの決定手法を示す。

パターン 1 は新規参加ノードの隣接ノードが、それ 1 台のみでかつ仮想空間上で枝の端(端点フラグが 1)であった場合のアドレス決定パターンである。図 4 に示すパターン 1 のアドレス決定の例では、既に存在しているノード A とノード B の枝に新たにノード N を加えるアドレス決定を行っている。パターン 1 の新規参加ノードのアドレス決定処理では、新規参加ノードは隣接ノードの仮想アドレスをコピーした後、隣接ノードとのノード間受信電波強度を用いて算出した仮想距離をコピーした仮想アドレスの最大次元アドレスに足し合わせる。これは仮想距離 0.0 にあたる枝の原点からの新規参加ノードの距離を表現するために行われる。また、新しく枝の原点になったことを表現するために、新規参加ノードの最大次元端点フラグを 1 に設定し、コピー元の隣接ノードに対して端点フラグの変化があったことを通知する。これらの処理により仮想アドレスの決定を行なう。

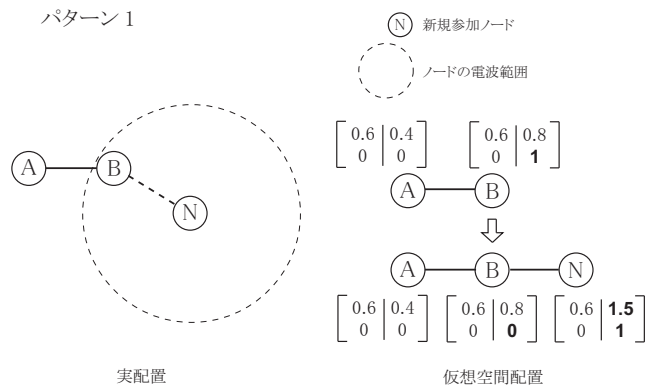


図 4 パターン 1 のアドレス決定

パターン 2 は新規参加ノードの隣接ノードが、それ 1 台のみで仮想空間上で枝の端点以外である場合の仮想アドレス決定パターンである。図 5 に示すパターン 2 のアドレス決定の例では、既に存在しているネットワークにノード N が新たに加わり、ノード B を原点とする新しい枝を生成するアドレス決定を行っている。パターン 2 のアドレス決定では隣接ノードを原点とする新しい枝を生成し、新規参加ノードは新しい枝に属するノードとして仮想空間上で扱われるようにする。パターン 2 の新規参加ノードのアドレス決定処理では隣接ノードの仮想アドレスをコピーし、最大次元の次の次元に新しい次元を加える。新たに最

大次元となった仮想アドレスの仮想距離には隣接ノードとの仮想距離を設定し、端点フラグには端点であることを表す 1 を設定する。また、コピー元の隣接ノードに対して新しい枝の原点になったことを通知を行い、通知を受けた隣接ノードは図の仮想アドレス太字部分で示しているように、保持している仮想アドレスの最大次元の次の次元に仮想距離 0.0、端点フラグ 0 の新しい次元を追加する。以上がパターン 2 の仮想アドレス決定処理である。

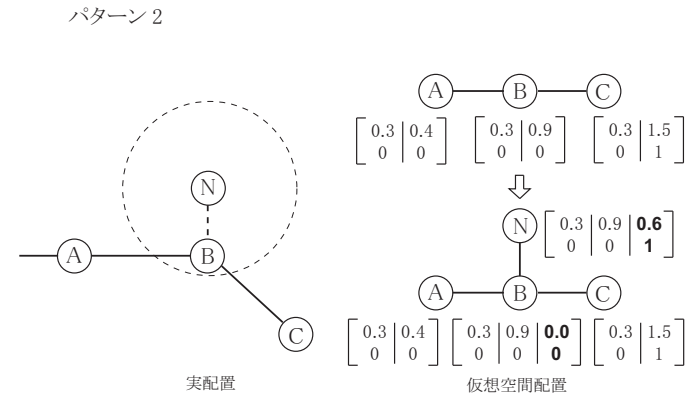
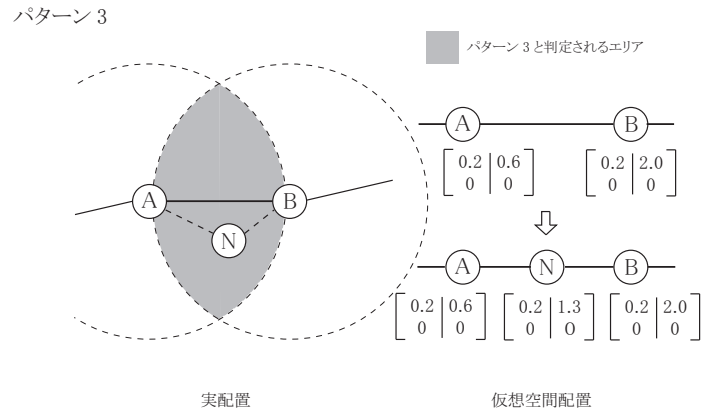


図 5 パターン 2 のアドレス決定

パターン 3 は新規参加ノードが仮想空間上で同一枝上に存在するノードの間に新たに参加する場合のパターンである。パターン 3 によるアドレス決定の例を図 6 に示す。一般的に既にあるネットワークに新たなノードが参加する場合、新たに参加するノードはネットワークの複数のノードと通信可能である場合が多々ある。MBCR においても例外なくこの状況は発生するが、MBCR では木構造をとるために、電波強度から推定される最も距離の近いノードを 2 つ選択し、そのノードを基にしてパターン 3 のアドレス決定を行う。ただし、パターン 3 と判定されるエリアは、最も距離の近い 2 つのノードの中間部分、つまり図 6 のノード A とノード B の中間の網掛けの部分のみであり、網掛けの部分以外の場合には隣接ノードの仮想アドレスを見てパターン 1 もしくはパターン 2 の判定を行う。パターン 3 で仮想アドレスの決定を行う際には 2 つの隣接ノードの仮想アドレスを用いる。新規参加ノードの仮想アドレスは 2 つの隣接ノードの属する枝部分までの次元のコピーを行い、枝部分の次元の仮想距離は 2 つの隣接ノードの仮想距離の中間値となる。また、枝部分の次

元の端点フラグは、端点ではないことを示す 0 となる。以上がパターン 3 の仮想アドレスの決定処理である。



それぞれのアドレス決定パターンにおいて、ネットワーク内のノードが増加してくると、新たに参加するノードの周囲に別の枝を持つ複数のノードが存在する場合がある。現在の仕様では、複数の枝を周辺に発見した場合、パターン 1 もしくはパターン 2 の場合は最も仮想距離の近いノードの枝のみから新しい仮想アドレスの決定を行う。また、パターン 3 の場合は、最も仮想距離の近いノードと次に仮想距離の近いノードを算出し、その 2 つのノードが同一枝上にあった場合にのみパターン 3 を適用する。ただし、手法として新規参加ノードを複数の枝に組み込む手法も考えられるため、どの枝にノードを新規参加させるかについての手法は今後詳細な評価を行っていく。

MBCR では、仮想アドレス決定時を含めて様々な処理の際に制御パケットとしてメッセージフレームを利用する。各メッセージフレームの名称と用途を表 2 に示す。HW メッセージと HWA メッセージは、ノードがネットワークに新規参加する際の電波強度の収集と仮想アドレスの通知の際に送信される。ACN メッセージは仮想アドレスに変更が生じた場合に周辺ノードに変更点を通知する際と、新規参加ノードが周辺ノードに対して仮想アドレスの通知を行う際に送信を行う。また、SR メッセージと RR メッセージは経路探索の際に経路探索対象までの経路を探す際に送信される。各メッセージフレームは、処理の必要が発生

した際に適時送受信を行う。5 種類のメッセージフレームの送信方法はメッセージによって異なり、HW メッセージと ACN メッセージはブロードキャストにより送信され、その他のメッセージフレームは、ユニキャストにより他ノードに配送される。

MBCR において通信を行う際には周辺ノード情報の収集と仮想アドレスを周辺ノードに通知する必要がある。この通信に用いる仮想アドレスの決定動作は、ノードがネットワークに参加する際に行われる。ノードは、ネットワークに新規に参加する場合に、ネットワーク新規参加要求メッセージである HW メッセージを周辺ノードに対してブロードキャストで送信を行なう。HW メッセージを受け取った周辺ノードは、ブロードキャスト送信元に対して、HW メッセージの受信時の受信電波強度と自ノードの仮想アドレスを添付した新規参加要求応答パケットである HWA メッセージを返送する。新規参加ノードは、HW メッセージの送信時にセットしたタイマーのタイムアウトを待って、タイムアウト時まで受信した HWA メッセージの集計を行なう。集計した HWA メッセージを処理することで自ノードの仮想アドレスの決定を行う。また、決定した仮想アドレスと周辺ノードに仮想アドレスの変更がある場合は変更箇所を ACN メッセージを用いて周辺ノードに通知を行う。以上が、ノードの新規参加時に行なわれる仮想アドレスの決定動作である。

3.3 経路確立手法

MBCR による経路の確立は、データパケットの送信要求が発生した際に行なわれる。ノード内のネットワークの上位層からデータパケットの送信要求メッセージを受け取った際、MBCR ではまずデータパケットの宛先ノードが自ノードの隣接ノードリストもしくは、既に経路判明リストに存在しているかの確認を行なう。どちらのリストにも宛先ノードが存

表 2 メッセージフレーム

HW メッセージ (Hello Wave)	ノードの新規参加時に、ネットワークへの参加を周辺ノードに通知する際に利用
HWA メッセージ (Hello Wave Answer)	HW メッセージに対する応答として、電波強度と仮想アドレスを新規参加ノードに通知する際に利用
ACN メッセージ (Address Change Notification)	仮想アドレスの変更が生じた際に、新しい仮想アドレスを周辺ノードに通知する際に利用
SR メッセージ (Search Route)	経路探索時に、探索対象ノードまでの配送に利用
RR メッセージ (Route Result)	SR メッセージが探索対象ノードに届いた際の返送に利用

在しない場合、自ノードと隣接ノードの仮想アドレスから、仮想空間上の同一枝上で、自ノードの上下にいるノードに対して、SR メッセージと呼ばれる経路探索パケットを送信する。SR メッセージを受け取った隣接ノードは、SR メッセージで指定されている仮想空間上の探索方向に向かって最終宛先ノードまで SR メッセージの中継を繰り返す。最終的に SR メッセージを最終宛先ノードが受信した場合、最終宛先ノードは SR メッセージに含まれる通過ノード情報を基にして、SR メッセージの送信元までの経路を自ノードの経路判明リストに追加する。また、SR メッセージの送信元に対して RR メッセージと呼ばれる経路探索応答パケットを送信する。RR メッセージには、SR メッセージまでの中継経路情報が含まれるため、RR メッセージを中継するノードは受け取った RR メッセージの送信元と最終宛先までの経路を自ノードの経路判明リストに追加していく。最終的に RR メッセージを受け取った SR メッセージの送信元ノードは、RR メッセージの中継情報からデータパケットの宛先までの経路を把握する。これらの手順により通信経路の確立を行なう。

3.4 シミュレーション

MBCR が既存のプロトコルに対して、制御パケット数においてどの程度有効であるかを確認するため、ネットワークシミュレータの QualNet を用いて、本研究の提案手法である MBCR と既存の無線メッシュネットワークルーティングプロトコルである HWMP のリアクティブ動作時における制御パケットの比較シミュレーションを行なった。シミュレーションのノード配置には、ランダムに配置された 30 台のノードを用いた。また、実験シナリオとして 5 秒間隔で新規参加ノードがネットワークに参加し、すべてのノードがネットワークに参加し終わった 5 秒後に特定のノードから遠方のノードまで固定ビットレートでのパケット転送を行なうシナリオを用いてシミュレーションを行なった。シミュレーションで得られた MBCR と HWMP における経路探索時の制御パケットの送信数を図 8 に示す。経路探索時の制御パケット送信数として、MBCR では SR メッセージと RR メッセージの送信数の合計を用いている。また、リアクティブ動作時の HWMP では、RREQ メッセージと RREP メッセージの送信数の合計を用いた。それぞれの制御パケットの全ノードでの合計数は、MBCR で 38 パケット、HWMP で 61 パケットであった。この結果から、経路探索時において MBCR を用いたルーティングでは HWMP に対して少ない制御パケットでの経路の探索を行えることが分かる。シミュレーションにおいて、経路探索時に送信されたパケット数が HWMP より少ない理由としては、経路探索パケットの配送経路を木構造上のノードのみに限定したことが考えられる。木構造上での経路探索を行った場合、配送経路が限定されるため配送経路長は増加する。シミュレーションにおいても現在の実装では配送経

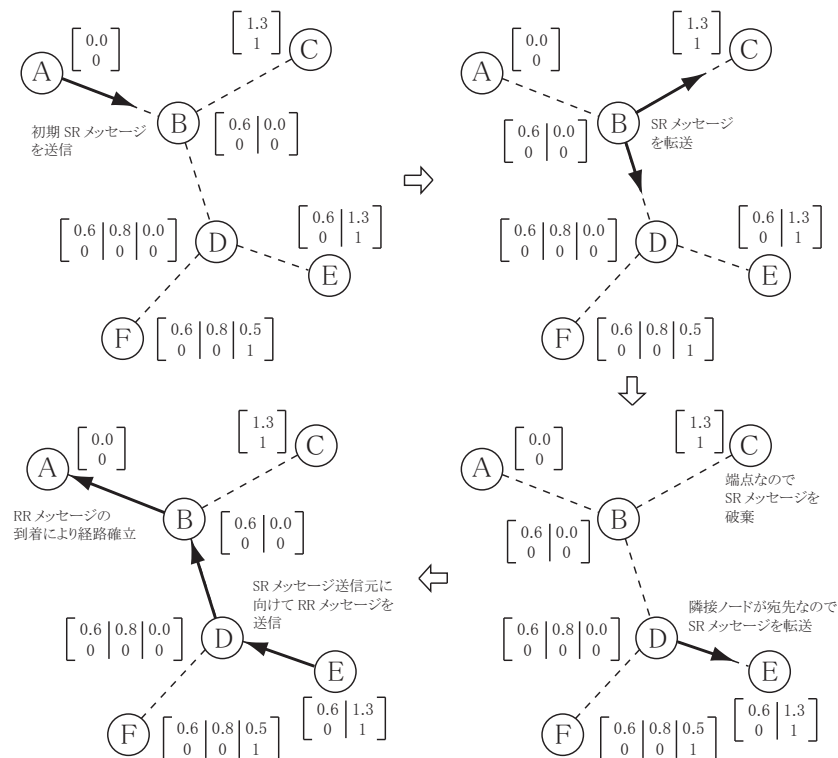


図 7 MBCR による経路確立動作

路長を考慮しないパケットの配送経路を算出しているため、配送経路長は増加していることを確認している。しかし、MBCR では RR メッセージの配送経路中で仮想アドレスを基にした配送経路の短縮を行うことが可能であるため、今後の研究で配送経路長の短縮は可能であるものと推測される。

また、通信開始から通信終了までの MBCR と HWMP の送信したすべての制御パケット送信数を図 9 に示す。すべての制御パケット数の比較においては、MBCR では HW, HWA, ACN, SR, RR メッセージの送信数の合計を用い、HWMP では RREQ, RREP, RANN, RERR の送信数の合計を用いている。図より、全体の制御パケット数においては MBCR の制御パケット数が圧倒的に多いことが見て取れる。この制御パケット数の差は、MBCR に

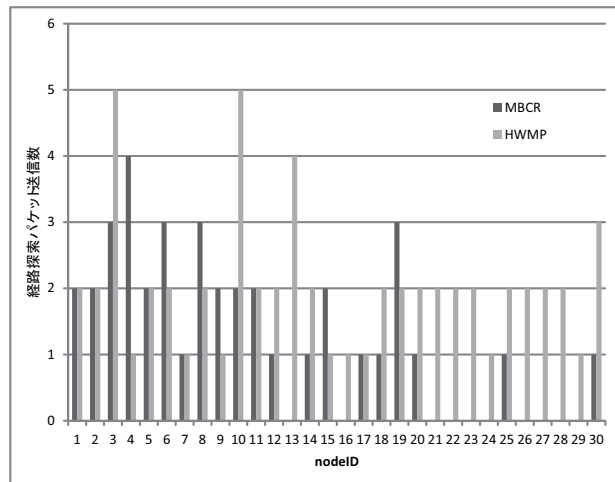


図 8 経路探索時の制御パケット送信数

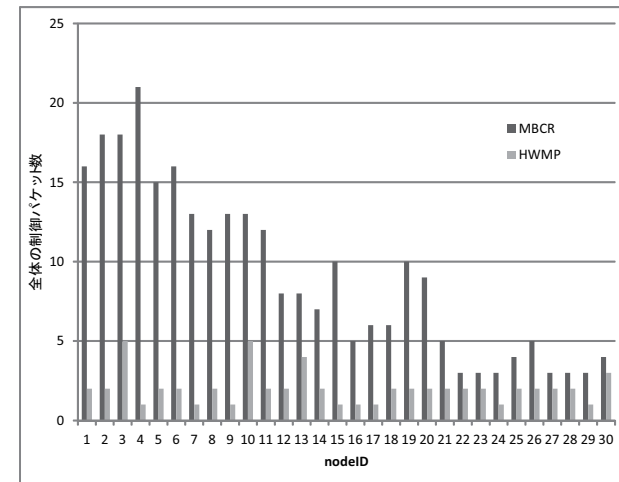


図 9 すべての制御パケット送信数

おける仮想アドレス決定処理の際の制御パケット数が影響していると考えられる。シミュレーションで用いたシナリオは、1つのノードから対象ノードまでの経路探索しか行わなかったが、より多くの通信セッションを使用する複雑なシナリオの実行時においては、この仮想アドレス決定処理の際の制御パケットは全体の制御パケット送信数として微々たるものになると考えられる。しかし、複雑なシナリオの実行時には経路探索に失敗するノードが発生していることを現在確認している為、プロトコルの仕様の見直しを含めたルーティング処理の追加が今後必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、無線メッシュネットワークの制御パケット数の削減を目的としたルーティングプロトコルである MBCR について、シミュレータへの実装と他プロトコルとの比較検証を行った。新たな仕様として、先行研究で定義されていた仮想アドレスの決定パターンと仮想アドレス決定の通信手順を継承し、決定パターンのパターン 3 と通信手順の一部に改良を加えてシミュレータへの実装を行っている。また、ネットワークシミュレータを用いて既存の無線メッシュネットワークルーティングプロトコルである HWMP との比較検証を行った。結果は、全体の制御パケット数において MBCR は HWMP に対して多数の制御パケッ

トを使用しているという結果であった。しかし、配送経路長を考慮しない条件ではあるが、経路探索時において MBCR は HWMP より少ない制御パケット数での経路確立を行えることを確認した。全体の制御パケット数に関するシミュレーション結果は、より複雑なシナリオを使用した場合、制御パケット数がほぼ等しい値に変化することを確認している。しかし、経路探索時においてもより複雑なシナリオでは、経路探索を行えないノードが発生していることを確認しているため、プロトコルの仕様の見直しを含めたルーティング処理の追加を現在進行中である。

参考文献

- 1) Michael Bahr: Proposed routing for IEEE 802.11s WLAN mesh networks, 2nd Annual International Workshop Wireless Internet (2006).
- 2) 間瀬 憲一, 阪田 史郎: アドホック・メッシュネットワーク, コロナ社 (2007).
- 3) Ian F. Akyildiz, Xudong Wang: A Survey on Wireless Mesh Networks, IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 9, (2005).
- 4) 高橋武尊, 植田和憲: 無線メッシュネットワークにおける初期経路確立手法の提案, 信学技報, vol. 109, no. 463, ICM2009-48, pp. 19-24, 2010.