

平成 29 年度

修士学位論文

WMN におけるリンク状況の長期的な  
変化に対応した経路制御手法の提案

Proposal of routing method for corresponding to  
long-term change of link status in WMN

1205086 矢野進也

指導教員 植田和憲

2018 年 2 月 28 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻  
情報システム工学コース

## 要 旨

# WMN におけるリンク状況の長期的な変化に対応した経路制御 手法の提案

矢野進也

近年、無線ネットワーク環境を構築する基盤技術である無線メッシュネットワークに注目が集まり、多くの研究が行われている。無線メッシュネットワークは有線で行われているアクセスポイント間の通信を無線マルチホップ通信によって実現される技術である。無線マルチホップ通信は、無線により他のノードを経由することで宛先までのデータの転送を可能にする。しかし、無線を用いて宛先へ転送しているため、環境の変化を受けやすく、障害物の発生やノードの移動によってリンクの状況が変化し、パケットの到達率が低下する。そのため、パケットの到達率を向上させる場合にリンク状況の長期的な変化の考慮を行う必要がある。

本研究では、無線メッシュネットワークに保管転送機能を持つ遅延耐性ネットワークの機能を用いることにより、リンクの切断や通信遅延へ対処し、パケットの到達率を向上させる。このことから、無線メッシュネットワークに遅延耐性ネットワークの一部の有用な機能を適用する際、URI 形式の識別子を用いた逐次名前解決をしなくてはならないため、IPv6 形式の IP アドレスを用いて各ノードで判断可能にすることで解決する。そして、無線メッシュネットワークにおけるリンク状況の長期的な変化に対応した経路制御手法の提案を行い、パケットの到達率向上を図る。

キーワード 無線メッシュネットワーク, HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol),  
MBCR (Multiple Branch Collection Routing), 遅延耐性ネットワーク

# Abstract

## Proposal of routing method for corresponding to long-term change of link status in WMN

Shinya Yano

In recent years, Wireless Mesh Network (WMN) is attracting attention. WMN is the basic technology for building wireless network environments. Therefore, a lot of research has been done on WMN. Wireless Mesh Network is a technology to replace wired communication with multi-hop communication between access points. Wireless multi-hop communication is a technique of wirelessly transferring data to a destination node via another nodes. Since the WMN is transferred to a destination node by radio, it is sensitive to the environment. It is necessary to consider routing method for corresponding to long-term change of link status.

In this research, in order to improve the stability of WMN, by using the function of Delay-Tolerant Networking (DTN) measures against link disconnection and communication delay are taken. When applying some useful functions of DTN to WMN, it is necessary to perform sequential name resolution using the URI type identifier. Therefore, resolving it at each node using IPv6 format IP address. A routing control method for corresponding to long-term change of link status in WMN, improve reachability of packets.

**key words** WMN (Wireless Mesh Network), HWMP, MBCR, DTN (Delay-Tolerant Networking)

# 目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	既存技術	3
2.1	無線マルチホップネットワーク	3
2.1.1	経路制御手法	4
2.2	無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network)	5
2.2.1	HWMP	6
2.2.2	MBCR	8
	仮想アドレス	9
	ビーコン	11
	経路制御	13
2.3	遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Networking)	14
2.3.1	バンドル層	16
2.3.2	中継転送技術	18
	確率的中継転送方式	18
	ハイブリッド型中継転送方式	19
第 3 章	提案手法	20
第 4 章	シミュレーション	23
第 5 章	まとめ	29
	謝辞	31
	参考文献	32

# 目次

2.1	無線マルチホップ通信による送信動作 . . . . .	3
2.2	無線メッシュネットワーク . . . . .	6
2.3	RM-AODV の制御通信 . . . . .	7
2.4	TBR の制御通信 . . . . .	8
2.5	リンク状態の仮想木化 . . . . .	8
2.6	IPv6 形式の仮想アドレス . . . . .	11
2.7	ビーコンによるネットワークへの参加 . . . . .	13
2.8	ノード C の保有仮想アドレス . . . . .	14
2.9	遅延耐性ネットワークの保管転送 . . . . .	15
2.10	バンドルの転送 . . . . .	16
3.1	IPv6 形式の EID . . . . .	21
3.2	経路の確認のタイミング . . . . .	21
3.3	経路決定処理 . . . . .	22
4.1	ノード数 4 とノード数 9 の配置 . . . . .	24
4.2	ノード数 9 のリンク切断時の配置 1 . . . . .	24
4.3	ノード数 9 のリンク切断時の配置 2 . . . . .	24
4.4	ノード数 4 のグリッド配置の packets 到達数 (MBCR) . . . . .	25
4.5	ノード数 4 のグリッド配置の packets 到達数 (HWMP) . . . . .	25
4.6	ノード数 9 のグリッド配置の packets 到達数 (MBCR) . . . . .	26
4.7	ノード数 9 のグリッド配置の packets 到達数 (HWMP) . . . . .	26
4.8	ノード数 9 のグリッド配置 2 の packets 到達数 (MBCR) . . . . .	27
4.9	ノード数 9 のグリッド配置 2 の packets 到達数 (HWMP) . . . . .	27

# 表目次

4.1 共通のシミュレーション設定 . . . . .	23
-----------------------------	----

# 第 1 章

## 序論

近年，インターネット上では様々なサービスが行われ，ネットワークの形態もサービスに適したものが求められるようになってきている．また，現在では無線通信の需要が高まっており，広域で低消費電力な無線環境が要求されることも増えてきた．

そして，災害現場や宇宙空間のように過酷な環境，イベント会場のように一時的にネットワーク環境を構築する基盤技術として無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network) が注目されている．無線メッシュネットワークとは，有線で行われていたアクセスポイント間の通信を無線マルチホップ通信に置き換えることによって宛先までの通信を可能にする技術である [1]．

無線マルチホップ通信は，無線通信を用いることで他のノードを経由し，中継するノードがバケツリレーのようにデータを宛先まで転送する技術である．この技術を用いることにより，無線メッシュネットワークでは自律的に経路が構築され，ノードの故障が発生した際にも迂回路を形成することで耐障害性の向上に繋がる．また，アクセスポイント間の通信を無線に置き換えているため，有線の敷設に掛かるコストの削減が可能である．

無線メッシュネットワークでは自律的に経路を構築し，経由するノードの決定を行う必要があるため，経路情報の交換を行う制御通信が発生する．制御通信と通常のデータ通信は同じ帯域で通信されているため，制御通信の数が増加したときに通常のデータ通信が抑制されてしまう可能性がある．このことから，制御通信の数を削減することができれば，通常のデータの転送機会を獲得し易くなり，配送効率が高くなることが考えられる．

そのため，本研究グループでは制御通信の削減を目的とした MBCR (Multiple Branch Collection Routing) と呼ばれる経路制御手法が提案され，研究されている．MBCR では，

隣接したノードとの通信から仮想アドレスと呼ばれる独自の位置情報を生成し、その情報を用いてリンク状態を仮想的な木構造として表現可能にする。宛先のアドレス情報を取得出来れば、自身のアドレス情報と隣接したノードのアドレス情報から経由するノードの決定が可能である。このことから、経路情報のやり取りのために、不特定多数に同時パケットを送信するブロードキャストや接続されている全てのノードにパケットを転送するフラッディングを用いる経路制御手法と比較すると制御通信の数が削減できる。

しかし、無線メッシュネットワークでの経路制御手法を用いていることから、環境の影響を受けやすく、長期的に利用する際はリンク状況の変化の考慮が必要となる。例えば、故障や移動したノードとのリンクの切断、通信の遅延により、パケットの損失が発生する可能性が考えられる。反対に一時的にリンクが切断されたノードが復活しても、要求が発生した際には存在しておらず、送信機会が失われてしまう場合もある。

本研究では無線メッシュネットワークの安定性を向上させるために、保管転送機能を持っている遅延耐性ネットワークの考え方を用いることでリンクの切断や通信遅延の対策する。遅延耐性ネットワークは OSI 参照モデルにおいて 4 層から 7 層の間に挿入される中継プロトコルを用いることになっているため、3 層以下の情報で経路制御を行っている無線メッシュネットワークにそのまま適用することは困難であると考えられる。このことから、無線メッシュネットワークに遅延耐性ネットワークの一部の適した機能を適用する際に課題となる点を解決することにより、無線メッシュネットワークにおけるリンク状況の長期的な変化に対応した経路制御手法の提案を行う。



## 第 2 章

# 既存技術

ここでは既存技術として主に無線マルチホップネットワーク、無線メッシュネットワーク、遅延耐性ネットワークについて説明する。

### 2.1 無線マルチホップネットワーク

無線マルチホップネットワークとは、無線通信を用いて他のノードを経由して構築するネットワークである。図 2.1 のように送信要求を行った送信元ノードと宛先のノードの距離が遠く通信できない場合でも、他のノードが中継ノードとしてデータパケットを転送することで通信が可能となる。また、障害物やノードの故障によって通信経路が断たれても、他のノードが存在すれば迂回路を形成することも可能である。

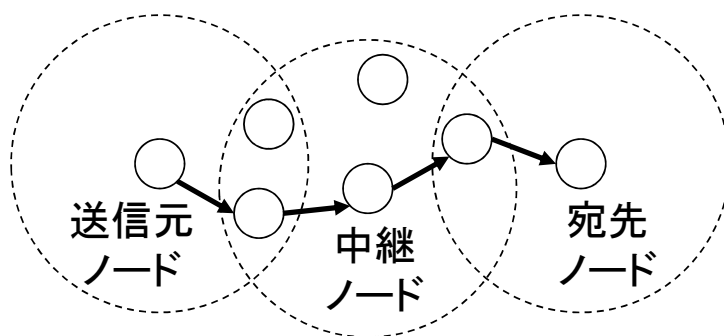


図 2.1 無線マルチホップ通信による送信動作

## 2.1 無線マルチホップネットワーク

### 2.1.1 経路制御手法

無線マルチホップネットワークの経路制御手法は大きく分類するとリアクティブ型、プロアクティブ型の2種類に分けることができ、その他としてはジオメトリックルーティングが存在する。

リアクティブ型の経路制御手法の特徴として、送信要求が発生した際に経路制御を行うための制御通信が発生し、経路表を生成することが挙げられる。このことから、この手法を用いて通信をする場合、プロアクティブ型と比較して新しい経路情報を用いて宛先までの通信をすることが可能となる。また、送信要求が発生しない場合に制御通信が発生しないことも利点として挙げられる。しかし、送信要求が発生してから経路表を生成することから通信の開始までに遅延が発生してしまう。この経路制御手法の代表的な例として、DSR (Dynamic Source Routing)[2] や AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector)[3] が挙げられる。

プロアクティブ型の経路制御手法の特徴として、定期的に経路制御を行うために制御通信し、経路表を生成することが挙げられる。定期的に生成されている経路表を用いるため、送信要求が発生したときに次ホップの決定を行うことで送信開始までの時間を短縮することができる。しかし、経路表は定期的に生成されるものであるため、制御通信の頻度が少ない場合は適した経路の選択できていない可能性がある。また、制御通信の頻度が多い場合、送信要求が発生していないときでも制御通信が発生してしまう点や通常のデータパケットが衝突しないように抑制されてしまうといった点がデメリットとして挙げられる。この経路制御手法の代表的な例として、OLSR (Optimized Link State Routing protocol)[4] や TBRPF (Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding)[5] が挙げられる。

リアクティブ型とプロアクティブ型の経路制御手法の特徴を説明したが、それらの手法を組み合わせた経路制御手法としてハイブリッド型と呼ばれる経路制御手法も存在する。例として、ZRP (Zone Routing Protocol)[6] が挙げられ、この手法は大きな範囲では IERP (IntErzone Routing Protocol) と呼ばれるリアクティブ型の手法で宛先の近くまで転送し、宛先の近くまで転送されたときは IARP (IntrAzone Routing Protocol) と呼ばれるプロア

## 2.2 無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network)

クティブ型の手法で宛先まで転送する手法である。

また、その他の手法としてジオメトリックルーティングと呼ばれる手法も提案されている。ジオメトリックルーティングとは GPS 機能などから取得できる位置情報を用いて経路の決定を行う制御手法である。この経路制御手法の代表的な例として GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)[7] が挙げられる。

## 2.2 無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network)

無線メッシュネットワークとは、有線を用いて行われていた従来のアクセスポイント間の通信を無線マルチホップ通信に置き換えることによって、アクセスポイント間の通信路を無線で自律的に構築する技術である [1]。

図 2.2 のように無線メッシュネットワークのノードは Mesh STA と呼ばれる Mesh 機能を有したノードによって構成されており、外部のネットワークと接続されている有線と繋がっているノードを Root Mesh STA と呼ぶ。Mesh STA を中継ノードとして Root Mesh STA まで転送することで、有線と接続されていない Mesh STA も有線に繋がっているネットワークと接続することも可能となる。現在、Mesh 機能を有していない従来の無線 LAN 機器である STA と Mesh STA は直接通信することはできないようになっている [8]。無線メッシュネットワークと STA の構成しているネットワークが通信する場合、DS (Distribution System) を介して行う。

従来の無線通信は、クライアントとアクセスポイントとの間では無線を用いてやり取りを行い、アクセスポイント間の通信には有線による通信を利用していた。このことから、無線メッシュネットワークでは無線を用いたアクセスポイント間の通信をすることにより、有線の敷設によって掛かっていたコストを削減が可能である。有線の敷設が困難な環境や臨時的にネットワークの構築を行う場合にも適した技術となることが考えられる。また、自律的に経路の構築を行うことから、故障したノードなどリンクの切断が発生した際に迂回路を形成

## 2.2 無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network)

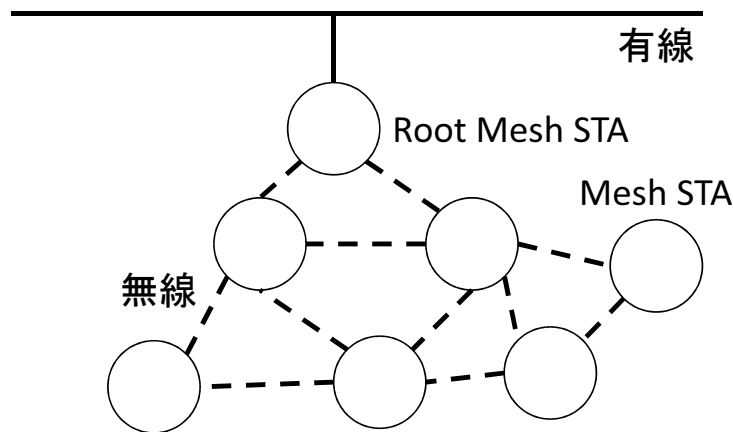


図 2.2 無線メッシュネットワーク

し、継続的に通信可能な環境が構築でき、耐障害性の向上にもつながる。

しかし、自律的に経路を構築することにより経路制御が複雑になってしまう点や、無線を用いていることによるリンクの状態の時間的な変化を考慮しなければならない点が課題点として挙げられる。経路制御が複雑になると経由するノードの決定に十分な情報の取得が必要になり、制御通信の数が増加してしまう。制御通信の数が増加すると、通常の通信との衝突を避けるために通信の抑制が発生し、通信機会の損失や通信遅延によるパケットの破棄が発生してしまう可能性がある。

### 2.2.1 HWMP

HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) は、IEEE802.11s と呼ばれる無線メッシュネットワークの国際規格によって定義されている経路制御手法である。Root Mesh STA が存在するかしないかによって動作が異なり、存在する場合はリアクティブ型とプロアクティブ型の両方を利用し、存在しない場合はリアクティブ型として動作する (参考文献あり)。HWMP は、リアクティブ型としては RM-AODV (Radio Metric Ad hoc On-Demand Distance Vector) が採用され、プロアクティブ型としては TBR (Tree Base Routing) が採用されている。

RM-AODV はパケットの送信要求が発生した際に、PREQ (Path Request) と呼ばれる

## 2.2 無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network)

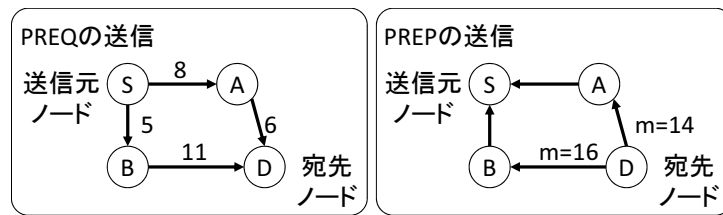


図 2.3 RM-AODV の制御通信

制御パケットを図 2.3 におけるノード S のように送信元となるノードが、ノード A やノード B のように通信可能な不特定の相手に同時にパケットを送信するブロードキャストを行う。ノード A やノード B のように PREQ を受信したノードは、リンク品質の指標であるメトリックを加算し、接続されている全てのノードに転送するフラッディングを行う。PREQ がノード D のような最終的に宛先となるノードまで転送された場合、そのノードは PREP (Path Reply) と呼ばれる制御パケットを PREQ を中継した経路で送信元のノードまで転送する。このとき、ノード A を経由した場合のメトリックは 14、ノード B を経由した場合は 16 として送信元ノードへと転送しているが、先にノード A を転送していた場合にはノード B の経路はノード A の経路よりもメトリックが悪いため転送されない。送信元ノードは受け取ったメトリック情報や所要時間、ホップ数などの経路情報を評価し、経路の決定を行うことでパケットの送信を開始する。また、この経路情報は一定時間保持することによって、通信のたびに経路探索のコストが増加してしまうことを抑制している。

TBR は RANN (Route Announce) と呼ばれるパケットを木構造の原点となるノードが定期的送信する。図 2.4 のように原点ノードである Root Mesh STA から送信された RANN を受け取った他のノードも転送することで、ツリー上の経路を形成し、作成した経路に従ってパケットの経由を行うノードを決定することを可能にする。

Root Mesh STA が存在する HWMP では、送信要求が発生した際に TBR によって形成されている経路を利用してパケットの送信を開始する。同時に RM-AODV で経路探索を行い、発見された適した経路に切り替える。これにより、送信要求発生時に遅延を発生させず、時間が経てば適した経路でデータパケットの転送が可能となる。

## 2.2 無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network)

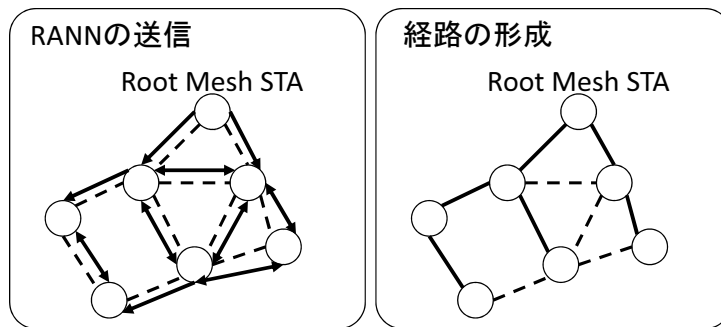


図 2.4 TBR の制御通信

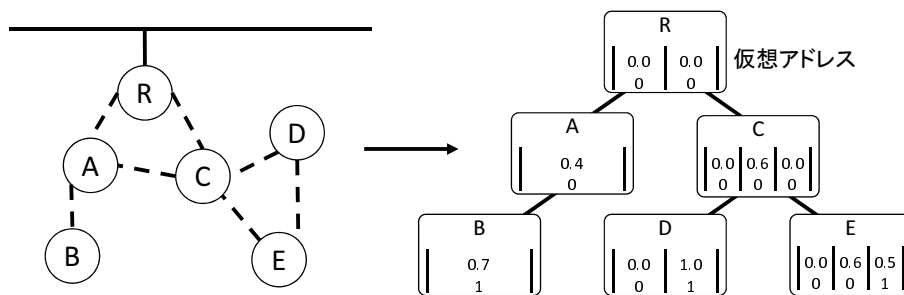


図 2.5 リンク状態の仮想木化

### 2.2.2 MBCR

MBCR (Multiple Branch Collection Routing) は無線メッシュネットワークの制御通信削減を目的とした経路制御手法である。MBCR では、隣接したノードとの通信から図 2.5 に記述されている形式の仮想アドレスと呼ばれる独自の位置情報を生成し、その情報を用いてリンク状態を仮想的な木構造として表現可能にする。このとき、表現された木構造を仮想木と呼び、Root Mesh STA を木構造の原点として形成する。

ネットワークの参加に必要な制御通信が隣接ノードとのみで可能であり、宛先となるノードの仮想アドレスの取得ができれば保有している仮想アドレス情報と比較することでパケットを中継するノードの決定が可能である。隣接ノードとは、無線メッシュネットワーク内のノードで無線通信によって直接通信可能な範囲に存在しているノードのことを意味している。仮想的な木構造を用いているが実際にはメッシュネットワークなため、中継ノードの決定には木構造上は繋がっていないノードが選択することも可能である。このことから、経路情報のやり取りのために、不特定多数に同時パケットを送信するブロードキャストや接続さ

## 2.2 無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network)

れている全てのノードにパケットを転送するフラッディングを用いる経路制御手法と比較すると制御通信の数が削減できる。

### 仮想アドレス

MBCR の仮想アドレスはネットワーク参加時に隣接ノードとの制御通信により決定される。仮想アドレスによって無線メッシュネットワークのリンク状態は仮想木と呼ばれる木構造を形成することが可能となり、仮想アドレスは仮想木毎に一意的な識別情報として利用することが可能となる。

仮想アドレスは以下の要素によって構成されている。

- 所属しているツリー ID
- アドレス次元
- ノードの終端情報
- 木の原点からの距離

MBCR の無線メッシュネットワークでは、同一のネットワーク内に複数の木構造が存在する可能性があることを前提にしており、どの木構造に所属しているか判別するために「所属しているツリー ID」が記述してある。

「アドレス次元」は原点から自ノードまでに仮想木が分岐した数分かるようになっている。分岐が発生していない場合の値は 1 となり、分岐が増えるたびにアドレス次元の値は増加し、上限は 8 次元までとしている。

「ノードの終端情報」は木構造の葉にあたるノードを識別する情報である。終端となるノードの場合に 1 であり、終端でないノードの場合は 0 となる。

「木の原点からの距離」は、ネットワーク参加時に隣接ノードと行われた制御通信の電波強度から算出された値を加算することで表現される。このときの距離値の計算では、電波強度を基にフリスの伝達公式を用いておおよその距離値を求め、最大伝達距離で割った値を用いる。フリスの伝達公式とは式 2.1 の計算式で表され、自遊空間を伝達される電力の割合に

## 2.2 無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network)

関しての計算式である。この計算式を用いることによって、送信された電波強度  $P_t$  と受信者が受信した電波強度  $P_r$ 、それぞれのアンテナの利得  $G_t$ 、 $G_r$  が分かれば、計算式から式 2.2 に変換しておおよその距離値を算出可能である。その値を最大電波到達距離で割ることによって、1 以下の値にして仮想アドレスの距離値として利用する。このとき、1 以上の値が算出された場合は 1 として仮想アドレス上では用いる。

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.1)$$

$$d_{real} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t (G_t G_r)}{P_r}} \quad (2.2)$$

$$d_{relative} = \frac{d_{real}}{d_{max}} \quad (2.3)$$

仮想アドレスの決定はビーコンを用いた隣接ノードとの制御通信によって行われ、木構造として延長するか分岐するかの 2 つの決定パターンが存在する。

仮想木上の枝を延長するように決定するパターンは、ネットワークに参加するノードの決定元となるノードに端点情報が 1 であるノードを選択した場合である。この場合は、ビーコンに記載されている決定元となるノードの仮想アドレスに、電波を受信した際の受信信号強度から算出された距離値を加算し、自身の仮想アドレスを決定する。決定元ノードはそのノードのネットワーク参加が確定した時点で自身の仮想アドレスの端点情報を 0 に書き換える必要がある。

仮想木上の枝を分岐するように決定するパターンは、ネットワークに参加するノードの決定元となるノードに端点情報が 0 であるノードを選択した場合である。この場合は、ビーコンに記載されている決定元となるノードの仮想アドレスに、電波を受信した際の受信信号強度から算出された距離値を新しい次元に加算し、自身の仮想アドレスを決定する。決定元ノードはそのノードのネットワーク参加が確定した時点で自身の仮想アドレスに新しい次元として、距離値 0.0 と端点情報 0 にしたものを追加する必要がある。



## 2.2 無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network)

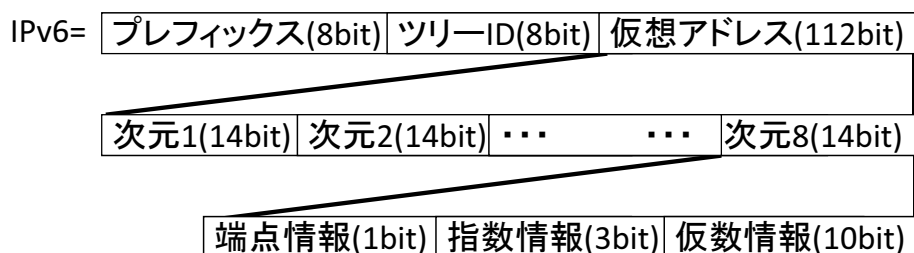


図 2.6 IPv6 形式の仮想アドレス

仮想アドレスの決定は隣接ノードのみとの制御通信で可能なため、ネットワークの参加に必要なとする制御通信の数を、ブロードキャストやフラッディングを行う経路制御手法と比較して削減可能である。

また、このように生成された仮想アドレスは独自のものであるため、MBCR では 128bit の IPv6 アドレスに変換したものを利用し、既存の通信に用いられている IP アドレスと併用することが想定されている。

図 2.6 は IPv6 形式の仮想アドレスのフォーマットを表現している。先頭の 8 ビットのプレフィックスはネットワークを識別する値である。ツリー ID の 8 ビットはどの木に所属しているかを表しており、112 ビットに仮想アドレスが記述されている。112 ビットの内訳は次元の上限数である 8 つに分割され、14 ビットずつ割り振られている。14 ビットの内、1 ビットは端点情報を表しており、指数情報 3 ビットと仮数情報 10 ビットとして表現されている情報は式 2.4 によって元の距離値として利用可能である。

$$(\text{距離値}) = 2^{(\text{指数情報})} \times (\text{仮数情報}) \quad (2.4)$$

### ビーコン

MBCR では仮想アドレスの決定やリンク状態の監視のために、小さな情報を定期的に発信するビーコンと呼ばれるパケットを発信する。ビーコンパケットが届かずリンクの切断を検知すると、仮想アドレスを破棄してネットワークに新しく参加するノードと同様の挙動で再参加することになる。

## 2.2 無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network)

ビーコンパケットに記載されている情報を以下に記述する。

- 送信元の所属メッシュネットワーク ID
- 送信元の MAC アドレス
- 送信元の IPv6 形式の IP アドレス

所属メッシュネットワーク ID は送信元のノードが所属している無線メッシュネットワークの識別に使うための情報である。MAC アドレスは送信元のノードの識別に必要な情報である。IPv6 形式の IP アドレスはノードの仮想アドレスを基にしたもので、仮想木上のノードの位置を把握するための情報である。

定期的送信されるビーコンを受信したノードが保持する情報を以下に記述する。

- 受信した送信者側のビーコン記載情報
- 受信回数
- 受信時間
- ビーコンの受信電波強度

受信した送信者側のビーコン記載情報は、ビーコン送信元が記載していた情報を記録しておくことによってどのノードが送信してきたパケットか識別するために使う情報である。ビーコンの受信電波強度は直近の電波強度を一定回数分残しておくことで、電波強度の変化が発生した場合でも平均的な値を算出可能にする。

ネットワークに参加するノードは、隣接ノードとビーコンを用いた通信を行うことによって仮想アドレスを決定し、ネットワークに参加する。図 2.7 は既存の隣接ノードとネットワークに新規に参加するノードの動作である。既存ノードは定期的ビーコンを発信しており、新規参加ノードは MBCR を有効化した際にそのビーコン情報を収集するタイマーを起動する。新規参加ノードは収集タイマーが終了すると収集した情報から決定元となるノードを選択し、自身の仮想アドレスを仮決定する。その後、決定元となるノードに対してロックメッセージを送信し、ロックタイマーを起動する。これは他の新規ノードが存在する場合

## 2.2 無線メッシュネットワーク (WMN: Wireless Mesh Network)

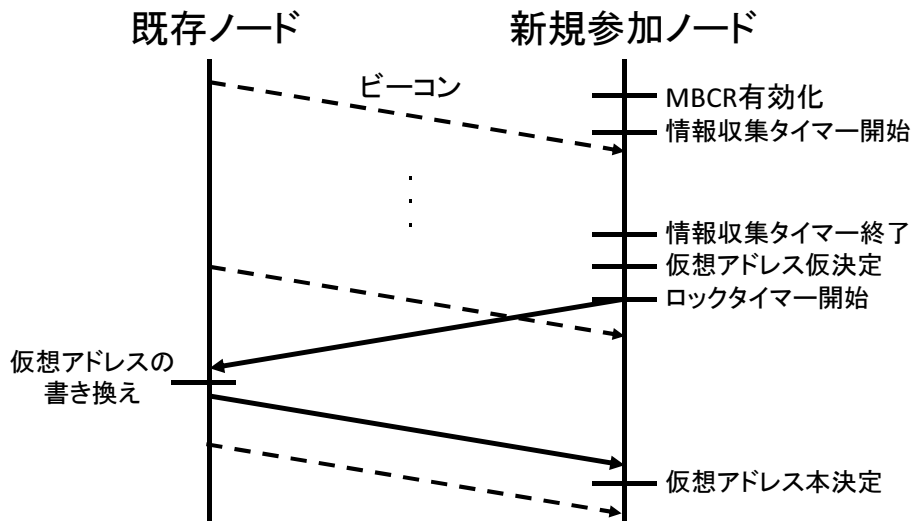


図 2.7 ビーコンによるネットワークへの参加

に競合が発生してしまわないように、書き換えが発生しないようにロックするものである。ロックメッセージを受け取った既存ノードはビーコンの情報などが正しいものであれば、決定パターンに従い自身の仮想アドレスを書き換えて、書き換えが成功すれば新規参加ノードに通知する。この通知が来ない場合は他のノードが参加していることが考えられるため、再び情報収集タイマーからの動作から同じ動作を繰り返す。

### 経路制御

MBCR での仮想アドレスを用いた経路選択を説明する。MBCR では、各ノードは自ノードと隣接ノードの仮想アドレスを予め保持しており、宛先のノードの仮想アドレスを取得することによって経路制御が可能となる。

隣接ノードリストに記載されているノードと宛先のノードの持つ仮想アドレスのツリー ID が一致するか確認を行い、ツリー ID が共通のものであった場合に仮想アドレスの比較を行う。比較方法としては、共通しているアドレス部分の次元数をカウントし、初めて共通でない次元が表れたときにその次元の差を算出する。その後、それより大きい次元のアドレスの値を加算する。加算された値を仮想的な宛先ノードまでの距離値として利用し、隣接ノードリストに記載されているノードから順次比較することで近いノードを次ホップノードとし

## 2.3 遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Networking)

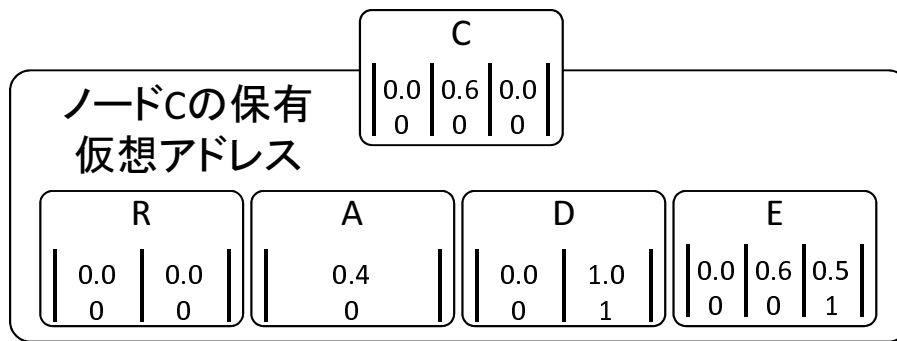


図 2.8 ノード C の保有仮想アドレス

て選択することで中継ノードの決定を行う。

図 2.5 のリンク状態と仮想アドレスを例にして距離値の計算の説明の補足を行う。図 2.8 はノード C を例として保有している仮想アドレスである。ノード C は自身の仮想アドレスと隣接していないノード B 以外の仮想アドレスを保持している。ノード B が宛先でノード C が中継ノードの場合を例にする。ノード B はアドレス次元 1 で原点ノードまでの距離は 0.7 である。ノード C は保有しているノードリストから一つ一つ比較を開始する。ノード R とノード B の宛先アドレスは、1 次元の時点で異なっており、その差は 0.7 となり、それ以降に求められる総和は 0.0 である。その他のノードも同様に計算していくと、ノード A は 0.3、ノード D は 1.7、ノード E は 1.8 となり、最も距離値の小さいノード A が中継ノードとして決定される。ノード A でも同様に比較が開始されるが、同一の仮想アドレスを保持しているノードが存在していることからノード B にデータが転送される。

このようにして、MBCR では距離値による経路の制御が可能となっている。

## 2.3 遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Networking)

遅延耐性ネットワークとは時間的・空間的に不連続性を持つネットワークにおける宛先への通信を実現する中継転送技術である [9]。また、遅延耐性ネットワークでは、遅延 (Delay) だけではなく、途絶 (Disruption) や切断 (Disconnection) も対象としていること

## 2.3 遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Networking)

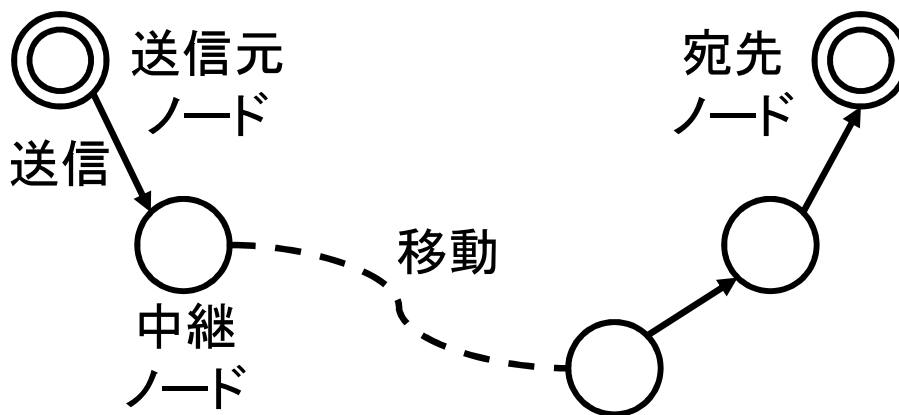


図 2.9 遅延耐性ネットワークの保管転送

から、Delay, Disruption, Disconnection Tolerant Networking と表現されることもある [9]。遅延耐性ネットワークの導入対象としては移動体通信ネットワーク、ワイヤレスセンサネットワーク、アドホックネットワークネットワークなどが挙げられる。図 2.9 は移動体通信に遅延耐性ネットワークを用いた例で、送信元から送信されてきたパケットを中継ノードが保管し、移動した際に適した送信タイミングが訪れたことにより、宛先まで転送することが可能となっている。このように、中継ノードがリンクの切断などが発生した際にパケットを蓄積し、適したタイミングが訪れたときに転送を行うことによって実現される。

遅延耐性ネットワークではアプリケーションが許容できる範囲で遅延を認めることにより、資源の効率的な利用や実現コストの低減を行う。ただし、アプリケーションができる範囲で遅延を許容することで実現されるため、対話型などの継続的な接続には適しておらず、その他の代替手段よりも適している場合の利用を前提としたものである。

また、ストレージがネットワーク全体で利用可能となるように分散的に配置されており、転送まで堅牢性や持続性を純分に保持可能げあることが前提とされている。

遅延耐性ネットワークは、バンドル層と呼ばれる OSI 参照モデルの 4 層から 7 層の間に挿入される中継プロトコルによって実装され、中継転送の形態によって決められる具体的な中継転送技術によって構築される。

## 2.3 遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Networking)

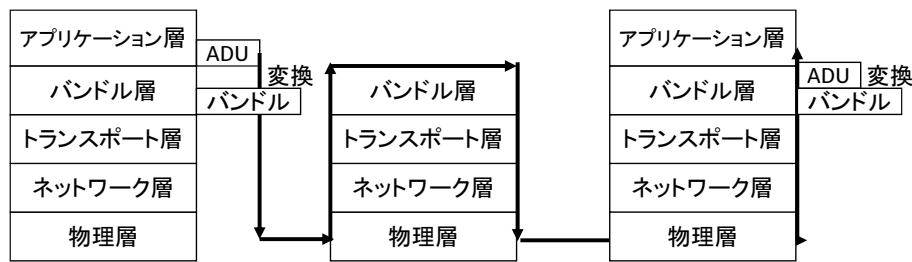


図 2.10 バンドルの転送

### 2.3.1 バンドル層

バンドル層とは OSI 参照モデルにおける 4 層から 7 層の間に挿入され、BP (Bundle Protocol)[10] と呼ばれる中継プロトコルによって実現される。バンドル層の役割として、バンドルと呼ばれるデータの保管転送を行うことで宛先までデータを伝達することが挙げられる。

遅延耐性ネットワークを用いるアプリケーションでは、ADU (Application Data Unit) と呼ばれる完成された単位のデータをアプリケーションに配信する。その際に、図 2.10 のように ADU をバンドル層へと受け渡し、バンドル層によって一つ以上のバンドルに変換される。また、バンドルでは他のプロトコルのデータユニットの保持を目的として、ヘッダやペイロードなどをブロックという単位で二つ以上に分割される。バンドルは DTN ノードを用いて宛先まで転送され、中継する過程でバンドルは分割したり、任意の場所で再構築することが可能である。最終的な宛先または任意のエンドポイントまで届き、全てのバンドルが到達し連結され、アプリケーションデータユニット長の合計が正しい時、リアセンブルが行われる。

バンドルに含まれている情報として 2 つ以上のブロックに分割された際に含まれている情報を以下に記述する。

まずは、宛先やバンドルの有効な期限などが記載されているプライマリブロックについて記述する。

- バージョン

## 2.3 遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Networking)

- プロセスのフラグ
- ブロックの長さ
- 送信元 EID
- 宛先 EID
- 報告先 EID
- 保管者 EID
- 送信元のタイムスタンプ
- シーケンス番号
- 有効寿命指標
- フラグメントの位置
- ADU の長さ

遅延耐性ネットワークの送信元や宛先などの識別には、EID (Endpoint Identifiers) と呼ばれる一般的な URI 構文で表現されている名前を利用する。EID は 1 つ以上の DTN ノードを参照可能であり、ノードが複数のエンドポイントの MRG (Minimum Reception Group) に存在する可能性もある。この EID を用いることによって遅延耐性ネットワークでは、逐次名前解決を行い、プロセスのフラグに記載されている配信オプションに従って、有効寿命が尽きるまで宛先まで転送を続ける。遅延耐性ネットワークでは、保管転送に責任を持ったノードが存在しており、他の DTN ノードが保管または転送した際に保管者や報告先の EID に対して保管転送が成功したことを報告し、報告されたノードの責任を解くことがある。

次に、バンドルのデータ本体となるペイロードなどが記載されているペイロードブロックについて記述する。ここには含まれているペイロードおよびペイロード自体に関する情報が記述されている。

- ブロックタイプ
- プロセスのフラグ

## 2.3 遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Networking)

- ブロックの長さ
- バンドルのペイロード

また、各バンドルにはプライマリ、ペイロードにあるフィールドに加えて追加ブロック内のフィールドが存在する。

バンドルの移動は保管転送と呼ばれており、データベースコミットトランザクションと類似している [11]。バンドルでは保管転送要求オプションと呼ばれるものがあり、それが含まれているバンドルに対しては保管転送受託信号をプライマリブロックに記載されている保管者に報告を行う。そして、現在の保管者 EID はバンドルが転送される前に転送ノードのユニキャストの EID の 1 つを含むように更新する。しかし、保管転送を要求しても必ず保管転送が提供できない場合もある。

### 2.3.2 中継転送技術

遅延耐性ネットワークでは、通信できなかったノードが通信可能範囲に移動することを接触と表現する。接触の種類には偶発的接触と計画的接触があり、どのような接触するかによって中継転送技術も変化する。

偶発的接触では、ホップバイホップで中継ノードの決定を行う確率的中継転送方式を用いる。

計画的接触はあらかじめ経路を決定する情報が得られるときに採用されることが多く、偶発的接触が発生する環境と同時に利用するハイブリッド型中継転送方式なども提案されている。

#### 確率的中継転送方式

確率的中継転送方式の中で代表的なものは感染型中継転送方式である。この方式はバンドルを保有しているノードが他のノードと接触した際に複製を送信する手法である。ネットワーク上の資源を消費するが、遅延に対しての性能が高くなっている。



## 2.3 遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Networking)

その改良案として 2 ホップ転送方式が提案された。2 ホップ転送方式とは、送信元となるノードのみが接触時に複製を転送し、そのバンドルを受け取ったノードは宛先となるノードにのみ転送する手法である。この手法は最大でも 2 ホップ以内に宛先に転送できるため、資源の消費が少ないが過度に消費量が抑制されているという評価を受けている。

その他の手法としては、過去に送信した履歴を利用することによって適したノードに転送することで、送信機会の可能性を高める手法が提案されている。

この手法は接触の予測が難しいため、宛先まで到達したバンドルの複製の削除が課題となっている。

### ハイブリッド型中継転送方式

ハイブリッド型中継転送方式は偶発的接触と計画的接触が入り混じった環境での利用が想定されている。代表的な手法として、メッセージフェリー、Data Mule、Virtual Segment などが挙げられる。

メッセージフェリーは、あらかじめ定められた経路を移動するノードをバンドルの移動手段として、遠隔地同士でのデータのやり取りを可能にする手法である。Data Mule は固定されているセンサに情報を保管して移動ノードが接触した際に情報を収集する手法である。Virtual Segment はクラスタが安定している場合にクラスタ間を固定的なネットワークで連結する手法である。

## 第 3 章

# 提案手法

本研究では無線メッシュネットワークの安定性を向上させるために、保管転送機能を持っている遅延耐性ネットワークの機能を用いてリンクの切断や通信遅延に対応する方法を用いる。これにより、通信の遅延や経路の途絶によって破棄されていたパケットを保持し、転送機会を増やすことで効率的にネットワーク資源を利用でき、パケットの到達率の向上が望める。

遅延耐性ネットワークでは名前解決できない環境を前提に研究されており、EID と呼ばれる URI 形式の識別子を用いて逐次名前解決を行っている。無線メッシュネットワークでは構成する中継機器で保管転送を行う必要があるが、OSI 参照モデルの 3 層以下の情報で中継することを想定しているため、逐次名前解決のために EID の利用が可能であることが保証できない。このことから、IPv6 形式の IP アドレスを用いることでの解決方法を提案する。

図 3.1 は URI 形式の EID を IPv6 形式の IP アドレスとして返還した際のフォーマットである。authority はリソースを保持しているホストを表しており、IPv4 の IP アドレス以上のサイズが必要とされることを考慮して 32 ビットを利用する。scheme はプロトコルなどを用いてインターネット上のリソースに対してのアクセス方法が記載されており、指定のポートにアクセスすることを考慮してポート番号を表すために 16 ビットを利用する。また、authority によってポート番号が指定されている場合は、そちらを scheme として割り当てられている場所へ書き込む。その他として、other には指定されているパスなどのリソースを識別するために必要な情報を記述するために 8 ビット利用する。

先頭の 8 ビットのプレフィックスはネットワークを識別するもので、無線メッシュネットワーク内の場合には使用されている経路制御手法に合わせて宛先まで伝送し、無線メッシュ

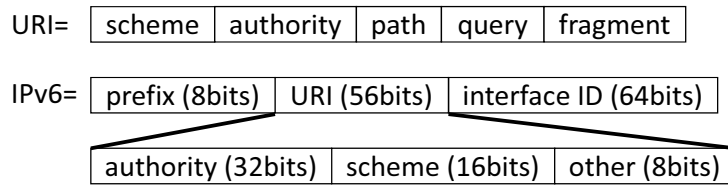


図 3.1 IPv6 形式の EID

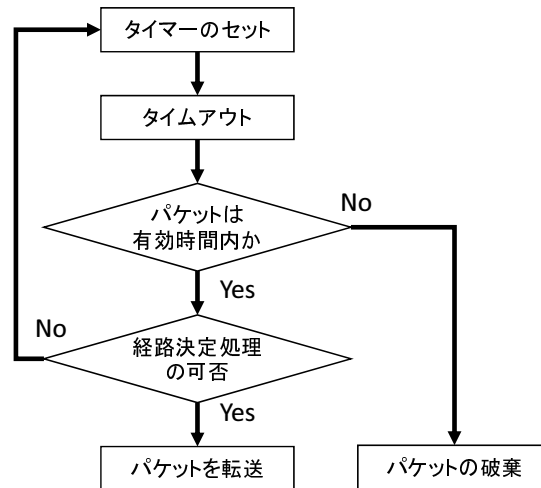


図 3.2 経路の確認のタイミング

ネットワーク外の場合は経路制御手法に合わせて Root Mesh STA に転送されネットワーク外との通信を行うことが可能となる。現在、ネットワーク外との通信を行う場合はネットワーク外との通信が可能なノードによって、外部のネットワークで利用可能なアドレスに変換を行うことで外部と通信することを想定している。また、遅延耐性ネットワークにおける EID は複数のノードで構成されることがあるため、64 ビットの interface ID によって個々のノードを識別可能にする。

これらの情報により、無線メッシュネットワーク内で経路が発見できず破棄されるはずの packets を保持した際に、宛先ノードの復帰や経路が発見できたときに中継ノードが判断して転送を可能となる。

図 3.2 は経路が形成されていないかの判定を行うタイミングを表している。パケットの送信要求が発生した際に、図 3.2 に記載されているタイマーを用意し、次ホップが決定されるかパケットの有効期限が切れるまで経路決定処理によって経路を探索する。

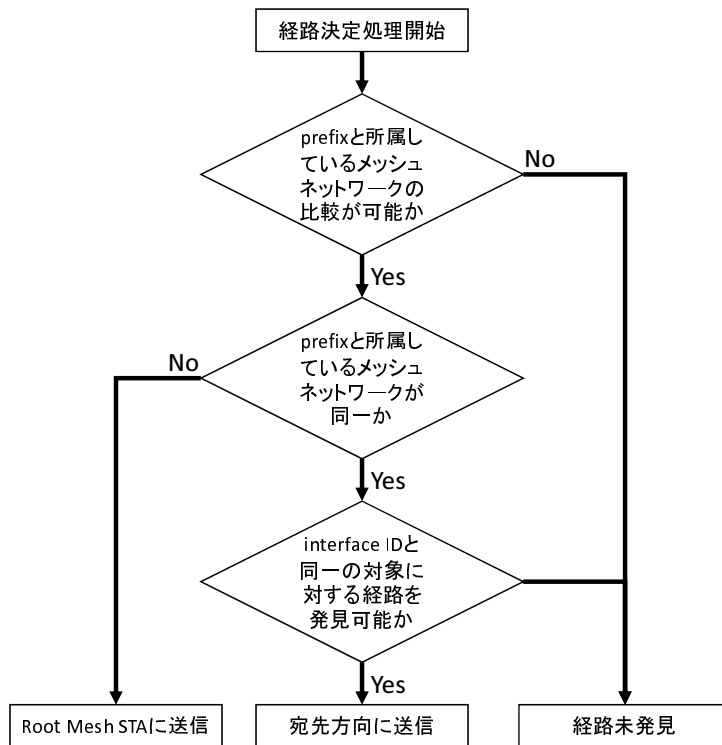


図 3.3 経路決定処理

そして、図 3.1 の情報を図 3.3 に記載したような順序で処理していく。まずは prefix に記載されている所属している無線メッシュネットワークと現在所属している無線メッシュネットワークの比較を行う。このときに、比較するための所属している無線メッシュネットワークの情報がない場合は経路未発見となり、図 3.2 のタイマーに戻り、無線メッシュネットワークに参加できるまで同様の処理を繰り返す。比較が可能な場合でネットワーク内ならば interface ID によって対象となる宛先への経路が無線メッシュネットワークの経路制御手法によって発見できるかの判定を行う。宛先への経路が発見できた場合は宛先へ向けて転送し、発見できなかった場合は再びタイマーへと戻る。同一のネットワークではなかった場合は Root Mesh STA に向けて転送を開始し、外部のネットワークに対して送信を行う。

これにより、通信の遅延や経路の途絶によって破棄されていたパケットを保持し、転送機会を増やすことでパケットの到達率の向上を目指す。また、定性的な評価として各ノードが宛先を判断可能にすることによって、逐次名前解決のために通信の度に発生する問い合わせを削減する効果が望める。

## 第 4 章

# シミュレーション

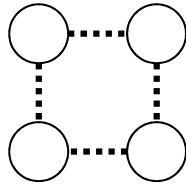
本研究では QualNet と呼ばれるシミュレータを利用し，経路が発見されずに破棄されるパケットを転送可能にすることで無線メッシュネットワークのパケット到達率が向上することを確認する．シミュレーションを行う上で全てのシミュレーションで共通となる環境の設定を表 4.1 に記載する．

本研究では図 4.4 などで示しているようにリンクの切断が発生しない環境と切断が発生する環境，切断が発生した場合に提案手法によって経路が発見できたときに転送した際のパケット到達率を比較する．また，今回の研究ではリンクの長期的な変化を対象としているため，激しいリンクの切断を繰り返す環境ではなく，確実に切断が発生し，経路やノードが復活する環境で，リンクの切断により破棄されるはずだったパケットに送信機会を与えることでネットワーク資源を効率的に利用できることを前提条件とする．それぞれのノードは固定配置し，ネットワーク全体で通信が発生し始めた後に特定のノードを移動してリンクの切断を発生させ，切断されたノードの復帰を行うような動作を行った．また，切断されたノードから切断の発生していないノードへのパケットや切断の発生していないノードから切断され

表 4.1 共通のシミュレーション設定

電波伝送モデル	FREE-SPACE
電波周波数	2.4 GHz
物理層プロトコル	PHY802.11b
データレート	11 Mbps

グリッド配置  
(ノード数4)



グリッド配置  
(ノード数9)

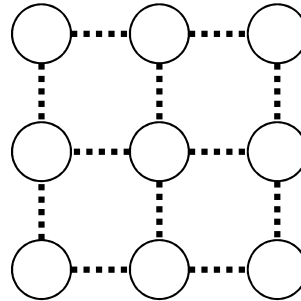


図 4.1 ノード数 4 とノード数 9 の配置

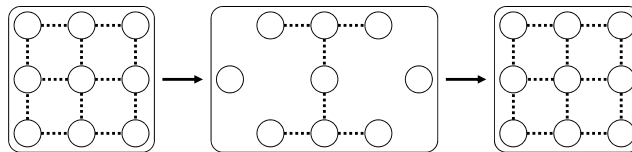


図 4.2 ノード数 9 のリンク切断時の配置 1

たノードへのパケット，切断されたノードを中継ノードとして選択した場合にパケットの送信タイミングを遅延させることによってシナリオ上でシミュレーションを行い，結果を比較した。

固定配置されたノードは図 4.1 のようなグリッド配置を行い，各ノードは破線によって繋がれた範囲のノードとのみ直接通信することが可能である．ノード数 4 のときのリンクの切断は各ノードが 1 つ通信範囲外に移動し，一定時間後に元の位置に戻るような動作を行った．ノード数 9 のときはリンクの切断方法として，図 4.2 のように一部の経路を切断することによって負荷が発生する環境と図 4.3 のようにリンクの切断によって一部のノードに送信

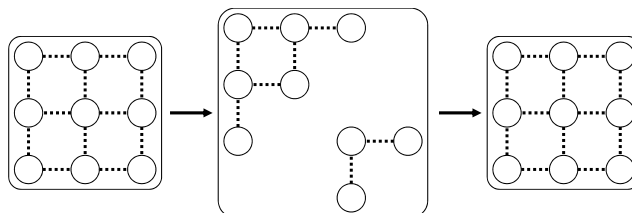


図 4.3 ノード数 9 のリンク切断時の配置 2

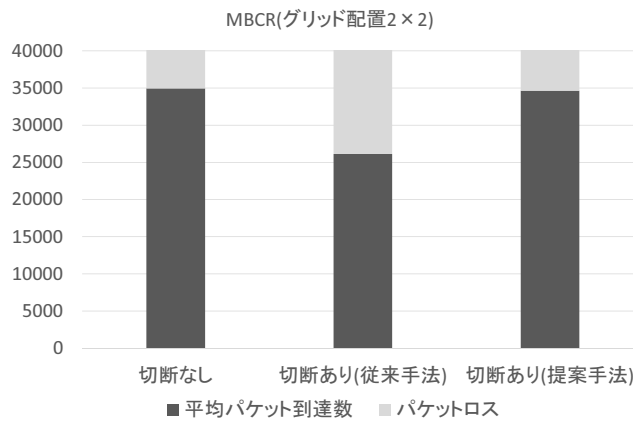


図 4.4 ノード数 4 のグリッド配置のパケット到達数 (MBCR)

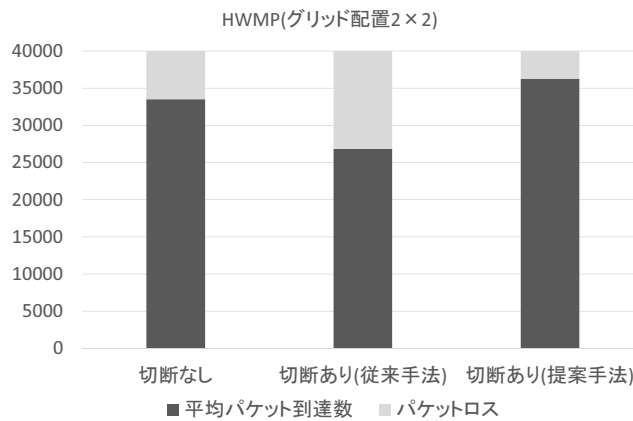


図 4.5 ノード数 4 のグリッド配置のパケット到達数 (HWMP)

できない環境を想定しシミュレーションを行った。

ノード数 4 のときのグラフ 4.4, 4.5 とノード数 9 のときのグラフ 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 から、リンクの切断が発生した場合に従来通りの手法を用いたときと提案手法を用いたときを比較することでパケットの到達数が向上することが確認できた。

ノード数 4 のときグラフ 4.4, 4.5 から、MBCR ではリンクの切断が発生しない環境と同程度の結果を得ることができ、HWMP では切断なしの環境と比較したときも伝達率が向上する結果が得られた。これは、ノード数が少ないことによって RM-AODV によって残されていた経路情報の利用頻度が増加しており、その情報を転送開始時間の偏りによって有効に利用できたからではないかと考えられる。

図 4.2 のような切断が発生する場合、グラフ 4.6, 4.7 から切断検知前に送信してしまった

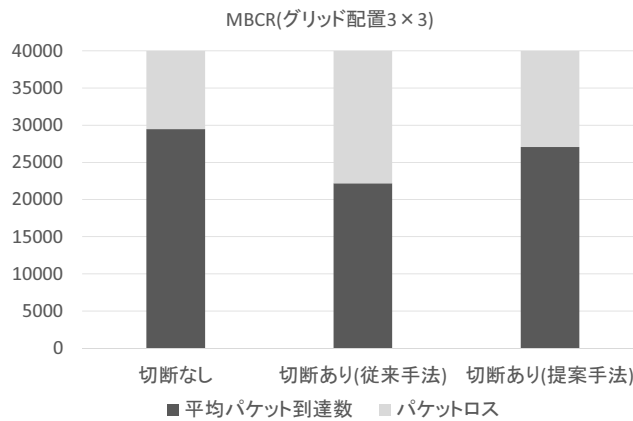


図 4.6 ノード数 9 のグリッド配置のパケット到達数 (MBCR)

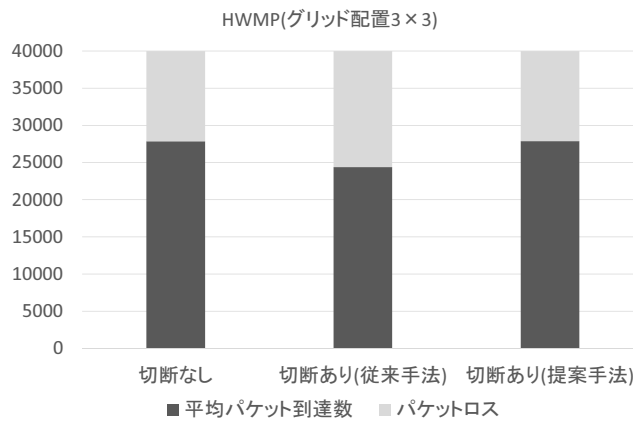


図 4.7 ノード数 9 のグリッド配置のパケット到達数 (HWMP)

パケットが発生してしまうことによってパケットの到達数が減少してしまっただが、提案手法によってリンクの切断が発生する環境でリンクの切断が発生しない場合の到達数に近い結果が得られた。

図 4.3 のような切断が発生する場合、グラフ 4.8, 4.9 から切断の発生しない環境と比較して、切断が発生した際の提案手法の方がパケットの到達数が増加している。このことから、図 4.2 のように経路が破壊されるだけではなく、孤立したノード間で通信が行われていることにより、制御通信とパケットの送信が分散的に行われ、元の配置に戻ったことによって送信可能になったパケットを送信することで、パケット送信の偏りが緩和されたためだと考えられる。

また、切断が発生しない環境で HWMP と MBCR の比較を行った場合には MBCR の方



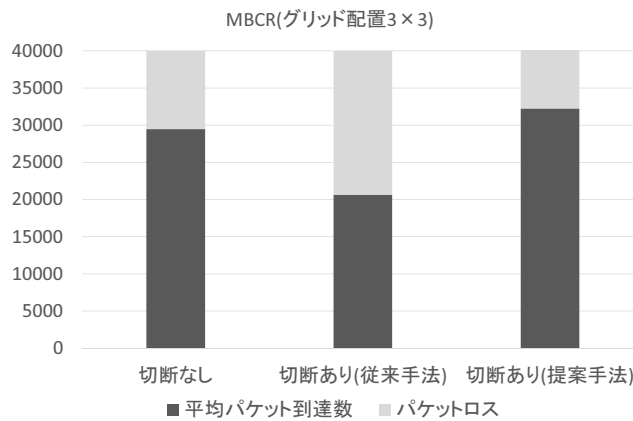


図 4.8 ノード数 9 のグリッド配置 2 のパケット到達数 (MBCR)

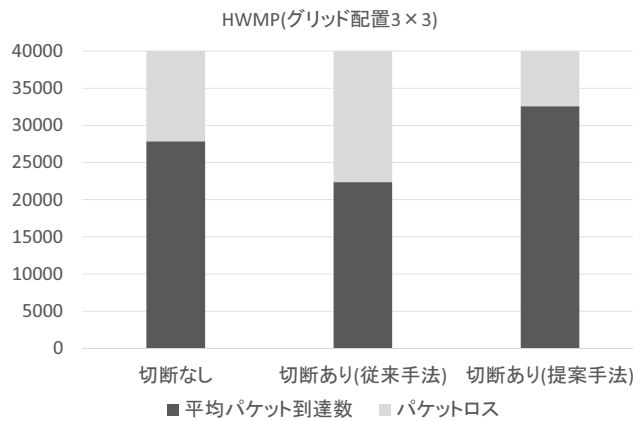


図 4.9 ノード数 9 のグリッド配置 2 のパケット到達数 (HWMP)

がパケットの到達率が高かったが、切断が発生した際に HWMP の方がパケットの到達率が高く、提案手法を適用すると同程度の性能になる結果になった。HWMP では、送信要求が発生した際に送信遅延をなくすために TBR によって転送を開始するが、それと同時にフラッディングを行う RM-AODV の動作を開始し、適切な経路を発見した際はそれらを利用することになっている。この RM-AODV によって増加する制御通信の数が一時的に減少したことと、切断が発生していた場合に適切な経路に切り替えることができていたことによってこの結果となったと考えられる。このことから、本研究の提案手法は、送信要求が発生するリアクティブ型の方が切断されたノードに送信を行わないことから適していると考えられることができる。

今後の課題として、転送時間開始時間の偏りによるパケットの到達率低下を解決すること

が挙げられる。条件によってはノード数 4 のときの HWMP のように到達率の向上が見込める可能性もあるため、偏りを分散させるか利用するかを検討を行う必要もあると考えられる。

## 第 5 章

### まとめ

無線メッシュネットワークは、有線で行われているアクセスポイント間の通信を無線マルチホップ通信に置き換えることによって、他のノードを経由して宛先まで転送することを可能にし、自律的に経路を構築してアクセスポイント間の通信を可能にする通信基盤技術である。自律的に経路を構築するため、耐障害性の向上や有線の敷設に掛かるコストの削減が期待されている。しかし、無線により経路を構築するため環境による影響を受けやすい。これにより、障害物の発生やノードの移動によるリンクの切断など、リンク状況の長期的な変化による転送機会の損失が発生する。

このことから、無線メッシュネットワークに遅延耐性ネットワークの適した機能を取り入れる。通信の遅延や経路の途絶によって破棄されていたパケットを保持し、転送機会を増やすことで効率的にネットワーク資源を利用できれば、パケットの到達率の向上が望める。しかし、遅延耐性ネットワークは OSI 参照モデルの 4 層から 7 層の間に挿入される中継プロトコルであるバンドル層を用いた技術であるため、3 層以下の情報で経路制御を行っている無線メッシュネットワークにそのまま適用は困難であると考えた。本研究では、遅延耐性ネットワークの一部の適した機能を適用する際に課題となる点を解決し無線メッシュネットワークにおけるリンク状況の長期的な変化に対応した経路制御手法の提案を行った。

遅延耐性ネットワークでは、ノードの識別子として URI 形式の EID を用いており、事前名前解決ではなく逐次名前解決を行うことが前提で研究されている。この EID を無線メッシュネットワークで取り扱うことのできる IPv6 形式の IP アドレスに変換し、無線メッシュネットワーク内の各ノードが識別子を基に宛先ノードを判断して無線メッシュネットワークの経路制御手法に沿って経路を発見し、転送する手法を提案した。また、提案手法を用いる

ことによって、リンクの切断発生時にパケットの到達率が向上することを QualNet のシミュレーションを用いることによって示した。

今後の課題として、リンク状態が回復した際の経路発見時に、転送時間開始時間の偏りによるパケットの到達率低下を解決することが挙げられる。ノード数が少ない時の HWMP のように条件によっては到達率の向上が見込める可能性もあるため、偏りを分散させるか利用するかの検討を行う必要もあると考えられる。

# 謝辞

本研究を進行していく中で多くのアドバイスをしていただいた植田和憲講師，副査を担当していただき貴重な意見をいただいた横山和俊講師と浜村昌則講師にお礼申し上げます。また，研究に関して指摘していただきました情報学群の先生方にも感謝いたします。論文の添削に協力していただいた研究室のメンバーにもお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 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, Sept. 2007.
- [2] D. Johnson, Y. Hu, and D. Maltz, “The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc network for IPv4,” Feb. 2007.
- [3] C. Perkins, E. Belding-Royer, and D. Maltz, “Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing,” July 2003.
- [4] T. Clausen and P. Jacquet, “Optimized link state routing protocol (OLSR),” Oct. 2003. RFC 3626.
- [5] R. Ogier, F. Templin, and M. Lewis, “Topology dissemination based on revers-path forwarding (TBRPF),” Feb. 2004. RFC 3684.
- [6] N. Beijar, “The zone routing protocol (ZRP)”.  
<http://www.utdallas.edu/~ksarac/Papers/ZRP.pdf>
- [7] B. Karp and H.T. kung, “GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless network,” Aug. 2000.
- [8] “Information technology - information technologytelecommunications 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 Std 802.11 2016.
- [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, pp.57–68, 2011.
- [10] K. Scott and S.Burleigh, “Bundle protocol specification,” Nov. 2007. RFC 5050.
- [11] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R.D.K. Scott, K. Fall, and H. Weiss, “Delay-Tolerant networking architecture,” April 2007. RFC 4838.